

Berekening CO₂-emissiefactoren voor Nederlandse luchtvaartpassagiers

Een studie uitgevoerd in opdracht van Milieu Centraal

Paul Peeters en Tamina Reinecke

Breda, 01-07-2021



DISCOVER YOUR WORLD



Breda
University
OF APPLIED SCIENCES

Samenvatting

Milieu Centraal gebruikt CO₂-emissiefactoren die gepubliceerd staan op www.CO2emissiefactoren.nl om consumenten eenduidige informatie te geven over de CO₂-emissies van vliegreizen en deze ook met andere vervoerwijzen of consumentenactiviteiten te kunnen vergelijken. Deze emissiefactoren zijn inmiddels verouderd en de huidige cijfers maken te weinig onderscheid qua vliegafstanden, vliegtuigtypen en luchtvaartmaatschappijen. Milieu Centraal heeft het CSTT (Center for Sustainability, Tourism and Transport) van Breda University of Applied Sciences daarom gevraagd om de huidige CO₂-emissiefactoren te actualiseren en eventueel te verfijnen.

Deze opdracht is vertaald in de volgende doelen:

1. Het herijken van de afstandsfactorformule voor het gemiddelde vanaf Nederlandse luchthavens.
2. Vaststellen van de basisemissiefactor voor de Nederlandse situatie.
3. Berekenen van de gewogen gemiddelde emissiefactor voor de door CO2emissiefactoren.nl gedefinieerde drie afstandsklassen en gesplitst voor Economy, Economy Premium, Business en First Class.

In dit rapport beschrijven we het *Flight Emissions Model* (FEM) ontwikkeld op basis van een representatieve steekproef van 5.473 vluchten, uitgevoerd in 2019 vanaf de vijf Nederlandse luchthavens van nationaal belang. De emissies van een vliegreis bestaan uit twee delen: de emissies als gevolg van het verbranden van brandstof door dat vliegtuig vanaf het moment dat het de motoren start tot het moment dat die weer worden afgezet. De belangrijkste parameters die de CO₂-emissiefactor bepalen zijn de afstand, de zitplaatsklasse, het vliegtuigtype en de luchtvaartmaatschappij.

De nieuwe CO₂-emissiefactoren zijn 2% lager voor afstanden tot 7000 km, 8% lager voor afstanden tussen 700 en 2500 km en 7% hoger voor afstanden boven de 2500 km. Echter, wat onze studie ook laat zien, is dat een representatie van de totale CO₂-emissies van een vlucht op basis van constante CO₂-emissiefactoren voor elk van de drie afstandsklassen leidt tot een niet-continu oplopende totale emissie voor de vlucht als functie van de afstand. Dat is geen juist beeld van de werkelijke situatie met afwijking tot 25%. Daarom geven we ook formules waarmee de CO₂-emissiefactoren op basis van de kortste afstand door de lucht tussen twee luchthavens veel exacter berekend kunnen worden. Er zijn formules geschat per zitplaatsklasse (*Economy*, *Economy Premium*, *Business* en *First*) en voor alle vluchten samen.

Voor nadere informatie kunt u contact opnemen met Paul Peeters (peeters.p@buas.nl).

Inhoudsopgave

SAMENVATTING	1
INHOUDSOPGAVE	2
BEGRIPPENLIJST	3
1 INLEIDING	4
1.1 AANLEIDING EN SCOPE	4
1.2 DOEL EN ONDERZOEKSVRAAG	5
1.3 OPZET VAN DE RAPPORTAGE	5
2 METHODE	6
2.1 HUIDIGE REKENWIJZE CO ₂ -EMISSIONFACTOREN	6
2.2 HET REKENMODEL FEM: OVERZICHT EN AANNAMES	7
2.3 GEDETAILLEERDE BESCHRIJVING REKENWIJZE IN FEM	9
2.3.1 <i>Algemene formule vliegtuigemissiefactoren (TTW)</i>	9
2.3.2 <i>De omwegfactor</i>	10
2.3.3 <i>Totale emissies van de vlucht</i>	11
2.3.4 <i>Bepaling van toedeling per zitplaats-klasse</i>	11
2.3.5 <i>De correctiefactor voor belly freight</i>	12
2.3.6 <i>De bezettingsgraad</i>	14
2.3.7 <i>Berekening van gemiddelde</i>	14
3 DATABASES	15
3.1 FLIGHTRADAR24	15
3.2 SMALL EMITTERS TOOL	16
3.3 AANVULLENDE DATA	17
3.3.1 <i>Zitplaatsklassen, cabine-indeling en aantal stoelen</i>	17
3.3.2 <i>World Air transport Statistics (WATS)</i>	17
3.3.3 <i>Overigen</i>	17
4 RESULTATEN	19
4.1 INLEIDING	19
4.2 OVERZICHT BELANGRIJKSTE RESULTATEN	19
4.3 DE NIEUWE EMISSIONFACTOREN PER AFSTANDSKLASSE	23
4.4 EMISSIONFACTOREN PER AFSTANDSKLASSE EN PER ZITPLAATSKLASSE	23
4.5 EMISSIONFACTOREN ALS FUNCTIE VAN AFSTAND	24
4.5.1 <i>Vergelijking drie verschillende rekenmethodes</i>	24
4.5.2 <i>Van emissiefactoren naar emissies</i>	25
VERRE REIZEN MILIEUVRIENDELIJKER?	26
4.5.3 <i>De exponentiële modellen</i>	27
5 AANBEVELINGEN	34
LITERATUUR	35

Begrippenlijst

Begrip	Verklaring
Belly freight	Betalende vracht die in het bagageruim meegaat.
Blokbrandstof	De CO ₂ -emissies als gevolg van de vlucht (zie ook definitie van vlucht).
Business Class	Business Class: deze biedt de reiziger aanzienlijk meer beenruimte en vaak ook een bredere stoel of een lege stoel tussen de reizigers waar men spullen kan neerleggen.
CO ₂ -emissies	Wanneer we CO ₂ -emissies schrijven bedoelen we ook alleen CO ₂ -emissies die, in ons rapport, vrijkomen door het verbranden van vliegtuigbrandstof.
CO _{2eq} -emissie	CO ₂ equivalenten: “the number of metric tons of CO ₂ emissions with the same global warming potential as one metric ton of another greenhouse gas”. ¹
Economy Class	De meest voorkomende zitplaatsklasse die doorgaans voor de laagste prijs wordt aangeboden en de minste ruimte en faciliteiten biedt aan de passagiers. Voor LCC's die vaak maar één zitplaatsklasse hebben, is deze standaard tot Economy Class gerekend.
Economy Premium Class	Veel luchtvaartmaatschappijen bieden Economy Class stoelen aan met een klein beetje meer extra ruimte, vaak in de orde van 1 of 2”.
First Class	First Class: dit is een soort super BC vooral geïntroduceerd door <i>legacy</i> luchtvaartmaatschappijen uit het Midden-Oosten en de VS.
GCD	<i>Great Circle Distance</i> : de kortste afstand over de aardbol tussen twee geografische punten (twee luchthavens) en rekening houdend met het gegeven dat de aarde een bol is.
Inch (“)	Engelse afstandsmaat (gelijk aan 2,54 cm).
LCC	<i>Low cost carrier</i> : ook wel prijsvechters genoemd. De definitie van een LCC is “an air carrier that has a relatively low-cost structure in comparison with other comparable carriers and offers low fares and rates. Such an airline may be independent, the division or subsidiary of a major network airline or, in some instances, the ex-charter arm of an airline group” ICAO (2009, p. 2). Bijvoorbeeld EasyJet.
Legacy carrier	Gewone netwerkvluchtvaartmaatschappijen met zoals de KLM.
Pkm	Passagierskilometer
Seat pitch	De afstand tussen de rugleuningen van twee stoelen in een vliegtuig. Doorgaans uitgedrukt in de Engelse maat inch (“).
Skm	Stoelkilometer
TTW	Tank-to-Wing: de CO ₂ -emissies als gevolg van de vlucht (zie ook definitie van vlucht).
Vlucht	Een ‘vlucht’ is het geheel van bewegingen van een vliegtuig vanaf het moment dat de motoren worden gestart tot het moment dat die weer worden afgezet. Dus dat is inclusief alle verplaatsingen op de grond zoals taxiën en de start en landing op de baan.
WTT	Well-to-Tank: de CO ₂ -emissies die ontstaan als gevolg van de winning en levering van de brandstof aan het vliegtuig.
WTW	Well-to-Wing: de CO ₂ -emissies die ontstaan als gevolg van de winning en levering van de brandstof aan het vliegtuig en door de vlucht (zie definitie van ‘vlucht’ in deze lijst). WTW staat gelijk aan WTT plus TTW.

¹ Bron: <https://www3.epa.gov/carbon-footprint-calculator/tool/definitions/co2e.html>

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en scope

Voorlichtingsorganisatie Milieu Centraal gebruikt CO₂-emissiefactoren die gepubliceerd staan op www.CO2emissiefactoren.nl (CO2emissiefactoren.nl, 2021) om consumenten eenduidige informatie te geven over de CO₂-emissies van vliegreizen en deze ook met andere vervoerwijzen of consumentenactiviteiten te kunnen vergelijken. Deze emissiefactoren zijn gebaseerd op de STREAM Personenvervoer studie van CE Delft (Otten et al., 2014) en zijn inmiddels verouderd (uit 2014). Voorts is er bij de vertaling van de oorspronkelijk door de KLM aan Otten et al. (2014) geleverde cijfers naar de op CO2emissiefactoren.nl gepubliceerde cijfers een onjuiste gemiddelde afstand per klasse gehanteerd. Ook zijn de cijfers gebaseerd op maar drie van de 43 vliegtuigtypen die regelmatig de vijf Nederlandse luchthavens aandoen, en maar één luchtvaartmaatschappij van de ongeveer honderd die op Nederland vliegen. Ook geven drie getallen voor drie verschillende afstandsklassen een onvolledig beeld van het effect van afstand op de emissiefactor en wordt geen onderscheid gemaakt naar zitplaatsklassen, waarbij een verschil van meer dan een factor tien kan optreden tussen de zuinigste en de meest milieubelastende klasse. Ten slotte is er aanleiding om de toerekening van emissies naar *belly freight* te heroverwegen. Zie verder paragraaf 2.1.

Daarom heeft Milieu Centraal het CSTT (Center for Sustainability, Tourism and Transport) van de Breda University of applied sciences gevraagd om de huidige CO₂-emissiefactoren die gepubliceerd staan op www.CO2emissiefactoren.nl (CO2emissiefactoren.nl, 2021) te actualiseren en eventueel te verfijnen. Milieu Centraal beheert onder andere een webpagina en calculator over de carbon footprint van vakanties².

De CO₂-emissies van een reis worden bepaald door de afgelegde afstand in combinatie met de emissies per reizigerskilometer. Door de twee te vermenigvuldigen verkrijgt je de totale CO₂-emissies voor die reis. De analyses beschreven in dit rapport betreffen het brandstofverbruik en de daarbij ontstane directe CO₂-emissies van de tientallen typen vliegtuigen waarmee naar honderden bestemmingen vanuit Nederland wordt gevlogen. De CO₂-emissies door de winning van grondstoffen en productie en distributie van brandstoffen wordt niet beschouwd en ook zijn andere broeikasgassen dan CO₂ niet meegenomen.

Er is niet alleen behoefte aan dergelijke cijfers bij Milieu Centraal, maar ook bij diverse andere partijen:

- De milieubewuste burger
- Bedrijven gebruiken ze om de CO₂-emissies van hun zakelijke en soms ook woon-werk-reizen te berekenen ten behoeve van hun duurzaamheidsbeleid en groene jaarverslagen.
- Aanbieders van CO₂-compensatie.
- Overheden op diverse niveaus ten behoeve van het bepalen van hun beleid, waaronder mobiliteits- en reisbeleid.
- Consultants die het bedrijfsleven en overheidsorganisaties helpen bij het berekenen van CO₂-emissies van vliegreizen.
- Wetenschap ten behoeve van onderzoek op het gebied van reizen en klimaatverandering.
- Onderwijs om daarmee leerlingen te laten zien wat reizen voor invloed op het klimaat heeft.

² <https://www.milieucentraal.nl/duurzaam-vervoer/vliegen-of-ander-vakantievervoer/>.

1.2 Doel en onderzoeksvraag

Het project heeft de volgende doelen:

1. Het herijken van de afstandsfactorformule voor het gemiddelde vanaf Nederlandse luchthavens.
2. Vaststellen van de basisemissiefactor voor de Nederlandse situatie.
3. Berekenen van de gewogen gemiddelde emissiefactor voor de door (CO2emissiefactoren.nl, 2021) gedefinieerde drie afstandsklassen en gesplitst voor Economy, Economy premium, business en First Class.

Het onderzoeksdoel is:

Het berekenen van CO₂-emissiefactoren van vliegreizen vanuit Nederland op basis van een representatieve steekproef van vluchten vanaf de vijf luchthavens van nationaal belang (Schiphol, Eindhoven, Rotterdam-The Hague Airport, Maastricht-Aachen Airport en Groningen Airport), gedifferentieerd naar vliegafstand en de zitplaatsklasse.

CO2emissiefactoren.nl (2021) publiceert al vele jaren drie constante CO₂-emissiefactoren voor de luchtvaart, namelijk voor een drietal afstandsklassen. Deze methode is in navolging van onder andere DEFRA (2008), die voor het Verenigd Koninkrijk een set standaard emissiefactoren publiceerde voor binnenlandse, korte internationale en lange internationale vluchten. Omdat met zo'n 'drie-getallen' aanpak veel nuances verloren gaan, hebben we er in het voor u liggende rapport voor gekozen de relatie tussen CO₂-emissiefactor en afstand uitgebreid te bestuderen en in detail te laten zien. Uiteraard is het soms noodzakelijk de communicatie over emissies van het vliegen eenvoudig te houden, maar wanneer het mogelijk is kan men beter de gedetailleerde formules gebruiken voor CO₂-emissiefactoren als functie van afstand en zitplaatsklasse. Hoe men de resultaten in dit rapport wil toepassen is aan de lezer ervan, maar de details die we geven helpen om het juiste evenwicht te vinden tussen eenvoud en nauwkeurigheid. In carbon calculators zoals die van Milieu Centraal is het onnodig de emissiefactoren te versimpelen tot drie gemiddelden en kan net zo goed met bijvoorbeeld de formules beschreven in 4.5.3 worden gewerkt.

1.3 Opzet van de rapportage

Hoofdstuk 2 beschrijft eerst de huidige gebruikte methode gebaseerd op data uit 2011-2014 (2.1) en de in ons rapport toegepaste rekenmethode en modellen (2.3). Hoofdstuk 3 beschrijft de databronnen. Hoofdstuk 4 levert een overzicht van de resultaten en gedetailleerde tabellen met cijfers en 5 geeft een aantal aanbevelingen over het gebruik van de resultaten.

2 Methode

2.1 Huidige rekenwijze CO₂-emissiefactoren

De huidige lijst van CO₂ emissiefactoren (CO₂emissiefactoren.nl, 2021) bevat de cijfers zoals weergegeven in Tabel 1. Deze cijfers komen uit de STREAM studie van CE Delft (Otten et al., 2014). De STREAM studie baseert zich op praktijkcijfers van een drietal vluchten met KLM-toestellen die de KLM veelvuldig inzet op de drie onderscheiden afstandsklassen. Het gaat om de volgende KLM-vliegtuigen en aannames:

1. Regionaal (<700 km): Embreer 190 met 64% bezettingsgraad
2. Europees (700-2500 km): B737-800NG met 69% bezettingsgraad
3. Intercontinentaal (>2500 km): B777-300ER met 80% bezettingsgraad.

De cijfers in Tabel 1 geven de huidige CO₂-emissiefactoren. We hebben deze vanuit de bron (Otten et al., 2014) omgerekend, omdat de bron alleen CO_{2eq} presenteert. Onze studie geeft overal CO₂. De reden daarvoor is dat we in onze studie alleen kijken naar wat vliegtuigen aan CO₂-emissies veroorzaken op basis van de brandstof die wordt verbruikt. Niet-CO₂-effecten worden in het algemeen toegerekend op basis van een factor bovenop de CO₂-effecten. Dus als de basis CO₂-emissiefactor van de vlucht niet klopt, gaat die omrekening ook fout. Datzelfde geldt voor het WTT-deel van de totale emissies: die bestaat uit een vast percentage van de emissies van de vlucht en als die CO₂-emissies van de vlucht niet kloppen, kloppen die WTT-emissies ook niet meer. Over de toe te passen factoren voor WTT en niet-CO₂ is elders gerapporteerd, onder andere door Milieu Centraal.

Tabel 1: Huidige emissiefactoren volgens CO₂emissiefactoren.nl (2021).

		Eenheid	TOTAAL (Well to Wing, WTW)	Tank to Wing (TTW)	Well to Tank (WTT)
	Km enkele reis		Kg CO ₂ /eenheid		
Regionaal	< 700	Passagiers- km	0,158	0,139	0,019
Europees	700 - 2500	Passagiers- km	0,107	0,094	0,013
Intercontinentaal	> 2500	Passagiers- km	0,078	0,069	0,010

Noot: we geven hier niet de exacte cijfers zoals CO₂emissiefactoren.nl (2021) die publiceert, maar we hebben die terug-gecorrigeerd van CO_{2eq} naar pure CO₂. Dit is gedaan om deze cijfers rechtstreeks met die uit onze studie te kunnen vergelijken.

De huidige CO₂-emissiefactoren behoeven een update, omdat:

- De cijfers van CO₂emissiefactoren.nl niet exact uit STREAM (Otten et al., 2014) zijn overgenomen. Zo komt bijvoorbeeld de gemiddelde afstand waarvoor het oorspronkelijke getal voor de KLM-vliegtuigen geldt niet overeen met de betreffende afstandsklasse waarvoor de cijfers worden gegeven door CO₂emissiefactoren.nl (2021). Daar had een correctie op de emissies toegepast moeten worden.
- Er zitten in de KLM-cijfers, die bestaan uit de LTO-emissies (Landing and Takeoff; Głowacki & Kawalec, 2015) en de klim- en kruisvlucht, vrij grote verschillen voor die LTO-emissies

met door de ICAO gepubliceerde standaard-cijfers voor de betreffende vliegtuigmotoren (ICAO, 2019). Dat is vooral vreemd omdat het voor de KLM erg lastig is om dat LTO-brandstofverbruik te onderscheiden van de gehele vlucht. Tegelijk is het de vraag waarom die gegevens apart zijn gegeven. In ons hieronder beschreven model zitten alle vluchtonderdelen van ‘block tot block’ (gate tot gate) en is een onderscheid naar verschillende fases van de vlucht niet zinvol. In de luchtvaartwereld spreekt men van blokafstand, blokvliegtijd en blokbrandstof.

- Het werken met een overall gemiddelde of met een beperkt aantal gemiddelden per afstandsklasse maakt dat vooral korte afstanden een te lage en lange afstanden een te hoge emissiefactor meekrijgen. Daarom is het belangrijk om zoveel mogelijk van de in paragraaf 4.5.3 getoonde afstandformules gebruik te maken, zoals in online emissie-calculators.
- De huidige cijfers maken geen onderscheid naar zitplaatsklassen, terwijl een vlucht met First meer dan tien keer zoveel emissies kan veroorzaken per reizigerskilometer als een vlucht in *Economy Class* of met een prijsvechter.
- Onderbouwing van de huidige cijfers is gebaseerd op slechts 3 vliegtuigtypen van één maatschappij, die bij elkaar in 2019 ongeveer 25% van alle vluchten, maar slechts 15% van alle CO₂-emissies vanaf de vijf Nederlandse luchthavens veroorzaakten.
- In de huidige cijfers is er rekening mee gehouden dat een deel van de emissies toegerekend moet worden aan de vracht aan boord van het vliegtuig. Daarbij is uitgegaan van de gemiddelde aandelen passagiers en vracht bij de drie KLM-typen. Nu is de KLM een maatschappij die relatief veel met *belly freight* vliegt, zelfs in hun korte-afstandsvliegtuigen; waar de meeste andere maatschappijen dat alleen toepassen in lange-afstandsvliegtuigen. Ook is de bezettingsgraad van passagiers en van vracht natuurlijk van belang. Wat opvalt is dat de Embraer E190 volgens KLM gemiddeld 1152 kg vracht meeneemt, terwijl de capaciteit van dat vliegtuig ongeveer 1 ton is. Het KLM-getal lijkt dus nogal hoog voor een gemiddelde (zie verder paragraaf 2.3.5).

2.2 Het rekenmodel FEM: overzicht en aannames

Het onderzoek richt zich op de berekeningen van de CO₂-emissies die ontstaan tijdens de vlucht, dat is vanaf het moment dat het vliegtuig van de gate weggrijdt tot het moment dat het na de vlucht bij de bestemmingsgate tot stilstand komt, de zogenaamde Tank-to-Wing (TTW) emissies. Ook is onze studie beperkt tot alleen de CO₂-emissies en niet de vaak gepresenteerde CO_{2eq}-emissies (equivalenten), waarin ook de effecten van andere broeikasgassen zijn verwerkt middels een omrekenfactor. Ook gaan we uit van de CO₂-emissies die door de verbranding van de kerosine door de vliegtuigmotoren ontstaat en negeren we de indirecte emissies als gevolg van grondgebonden activiteiten op luchthavens, aanleg en onderhoud van infrastructuur en productie en onderhoud van vliegtuigen. Om de totale CO₂-emissies te bepalen moeten ook de CO₂-emissies die vrijkomen bij het winnen van de grondstoffen en de productie van de brandstof en de distributie, de zogenaamde Well-to-Tank (WTT) emissies, in kaart gebracht worden. De som van WTT-emissies plus TTW-emissies levert de totale CO₂-emissies veroorzaakt door de reis, de zogenaamde Well-to-Wing (WTW) emissies.

De in dit rapport beschreven CO₂-emissiefactoren zijn representatief voor de mix van vliegtuigtypen, bestemmingen en luchtvaartmaatschappijen die vanaf de vijf Nederlandse luchthavens van nationaal belang vliegen, maar niet noodzakelijkerwijs gelijk aan die voor vluchten elders in de wereld.

Ook maken we in onze studie onderscheid tussen een viertal zitplaatsklassen. Er bestaan vele tientallen *fancy* namen voor de zitplaatsklassen, doorgaans bedoeld als marketinginstrument. In navolging van SeatGuru (2021) en gebaseerd op een eerdere indeling door IATA (*International*

Air Transport Association) gedefinieerde codering (Wikipedia, 2021a) gebruiken we vier zitplaatsklassen in ons model waar de meeste klassen met meer ‘fancy namen’ onder vallen:

1. *Economy*
2. *Economy Premium*
3. *Business*
4. *First*

Ten behoeve van dit project is het *Flight Emissions Model* (FEM) ontwikkeld door het Centre of Sustainability, Tourism and Transport van Breda University of applied sciences. Dit Excel model bepaalt op basis van diverse databases (zie hoofdstuk 3) een nauwkeurige inventarisatie van de CO₂-emissies van een set van 5.473 vertrekkende vluchten vanaf de vijf belangrijkste luchthavens in Nederland in 2019. De gegevens voor deze vluchten zijn voor dit project aangekocht bij FlightRadar24 (2021), zie details in 3.1. De set is opgeschoond voor alle vluchten waar geen passagiers in zitten (vrachtvliegtuigen, positioneringsvluchten en binnenlandse vluchten) en is representatief voor de samenstelling van de vloot, de aandelen van luchtvaartmaatschappijen en de bestemmingen bediend door deze luchtvaartmaatschappijen.

De CO₂-emissiefactor per passagierskilometer (pkm) en per zitplaatsklasse hangt van de volgende variabelen af (in *grijs cursief font* waar het FEM alleen impliciet rekening mee houdt):

- De werkelijk gevlogen afstand
- De rechtstreekse afstand (*Great Circle Distance* ofwel GCD)
- Het type vliegtuig (combinatie van *airframe* en motor)
- Het aantal zitplaatsen per vliegtuig en de verdeling daarvan over de klassen
- De ruimte van een zitplaats plus gangpad per zitplaatsklassen
- Het aandeel commerciële vracht
- De bezettingsgraad
- *Weersomstandigheden (met name wind, maar ook temperatuur heeft invloed op het brandstofverbruik van een vliegtuigmotor)*
- *Luchtverkeersleidingsinvloeden waardoor niet altijd op de economisch meest optimale hoogte en snelheid kan worden gevlogen.*
- *Het flight schedule (vlieghoogte, kruis-, klim- en daalsnelheden)*

De grijze factoren zijn niet expliciet meegenomen, maar zitten impliciet in het door ons gebruikte vliegtuigemissie model (Eurocontrol, 2020). Dat model wordt in 3.2 verder beschreven.

Het model berekent voor elk van de 5.473 (rechtstreekse) vluchten het volgende:

1. De afstand in rechte-lijn (*Great Circle Distance*; GCD) (zie 2.3.3)
2. De afstand door de lucht (*Air Distance*; AD) middels een ‘omwegfactor’ (zie 2.3.2)
3. Het totale brandstofgebruik, de blokbrandstof, van het voor die vlucht gebruikte vliegtuig naar de betreffende bestemming en volgens de werkelijk gevlogen afstand (AD) met behulp van het Eurocontrol-model Small Emitters Tool (SET) (zie 3.3). Het SET rekent dit brandstofverbruik rechtstreeks om naar CO₂-emissies middels de daarvoor door SET toegepaste emissiefactor van 3,15 kg CO₂/kg brandstof.
4. Voor lange-afstandsvliegtuigen (de zogenaamde *Widebodies*, WB-vliegtuigen) worden de CO₂-emissies met een vrachtfactor (<1.0) vermenigvuldigd, zodat het aandeel van de emissies dat naar vrachtvervoer in hetzelfde vliegtuig gaat wordt verrekend. Voor vliegtuigen op kortere afstanden (de *Narrowbodies*, NB) hebben we deze factor standaard op 1 gezet omdat daar meestal geen of slechts weinig vracht mee wordt vervoerd (zie methode voor de berekening van deze factor 2.3.5).

5. De in de vliegtuigcabine gebruikte ruimte wordt toegedeeld naar de aanwezige zitplaatsklassen (zie 2.3.4).
6. De per zitplaatsklasse toegedeelde CO₂-emissies worden gedeeld door het aantal zitplaatsen van de betreffende klasse en de afgelegde GCD zodat de CO₂-emissiefactor per stoelkilometer (skm) per klasse en voor het totaal gemiddeld ontstaat. In punt 3 gaan we uit van de werkelijk gevlogen afstand om ook het werkelijke brandstofverbruik uit het SET te krijgen, maar hier delen door de GCD omdat die eenvoudig is te bepalen via standaard websites daarvoor (zie bijvoorbeeld Swartz, 2020) door burgers, webbouwers, consultants, etc. Welke omweg vliegtuigen hebben gevlogen is geen openbare informatie. Bij de berekening van de benodigde brandstof voor de hele vlucht moet uiteraard uitgegaan worden van de werkelijke afstand door de lucht (AD), vandaar dat beide afstanden in het model nodig zijn.
7. Vervolgens worden de emissiefactoren per stoelkilometer omgerekend naar die per passagierskilometer op basis van typische bezettingsgraden per luchtvaartmaatschappij op basis van de *World Air Transport Statistics* (IATA, 2020).
8. De resultaten worden gepresenteerd als functie van de belangrijkste invloedsfactoren zoals afstand, afstandsklasse, type vliegtuig, type luchtvaartmaatschappij en (zie hoofdstuk 4).

2.3 Gedetailleerde beschrijving rekenwijze in FEM

2.3.1 Algemene formule vliegtuigemissiefactoren (TTW)

De algemene formule voor de emissiefactoren van de TTW CO₂-emissies per passagierskilometer (pkm) in het FEM is:

$$EF_{klasse_{pkm}} = \frac{C_{vracht} * \left(\frac{Em_{vlucht} * \left(\frac{Opp_{klasse}}{Opp_{tot}} \right)}{Seats_{klasse}} \right)}{BG_{LM} * D_{GCD}}$$

Daarin hebben de variabelen de volgende betekenis:

$EF_{klasse_{pkm}}$	De emissiefactor per klasse en passagierskilometer
C_{vracht}	Factor die de emissies verdeelt over passagiers en vracht: 1,0 betekent alles naar passagiers en 0,0 alles naar vracht. Gemiddeld (ongewogen) is deze factor 0,97 voor alle vluchten en 0,79 voor alleen de WB-vliegtuigen.
Em_{vlucht}	De totale emissies voor een vlucht op basis van het gebruikte vliegtuig en AD, de werkelijk gevlogen afstand (AD = omwegfactor * D _{GCD}) en berekend met het SET ³ .
Opp_{klasse}	Het totale oppervlak van de passagierscabine dat door de betreffende klasse wordt ingenomen
Opp_{tot}	Het totale oppervlak van de passagierscabine ongeacht klasse
$Seats_{klasse}$	Het aantal stoelen per klasse voor het betreffende vliegtuigtype en luchtvaartmaatschappij combinatie.
D_{GCD}	De afstand als <i>great circle distance</i> .
BG_{LM}	De gemiddelde bezettingsgraad voor de betreffende luchtvaartmaatschappij.

³ Het SET biedt ook de mogelijkheid om de omweg door SET te laten bepalen maar dat bestaat uit het standard bijtellen van 90 km en dat is een beetje te eenvoudig.

2.3.2 De omwegfactor

Door de GCD te vermenigvuldigen met een ‘omwegfactor’ kan men de werkelijke gevlogen afstand bepalen. Deze is nodig om het werkelijke brandstofverbruik van een vliegtuig te bepalen. Het enige dat een vliegtuig ‘voelt’ en dat dus het brandstofverbruik bepaalt, is de lucht, de *air distance* (AD). Omdat we uitgaan van nul-wind zijn de werkelijke afstand over land en de AD exact gelijk. Uitgegaan is van omwegfactoren die jaarlijks worden gebruikt voor de rapportage onder auspiciën van het CBS van de CO₂-emissies van de Nederlandse vakantieganger (de meest recente is gerapporteerd door Eijgelaar et al., 2021) en weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Omwegfactoren voor 5 afstanden (Peeters, 2018),

Min (km)	Max (km)	Omwegfactor
0	500	1.2
500	1000	1.15
1000	1500	1.11
1500	2000	1.08
2000	30000	1.05

Omdat bovenstaande getrapte factoren kunnen veroorzaken dat een vlucht van 1.499 km hogere emissies krijgt toebedeeld dan eentje van 1.501 km, die net een kleinere omwegfactor krijgt, zijn bovenstaande getallen verder aangevuld met data uit Atmosfair (2016) en is de volgende formule geschat (dit soort *curve fitting* wordt o.a. toegepast in ecologische studies (Even, 2003)):

$$F_{omweg} = C_a + C_b * e^{\frac{-GCD}{C_c}} + C_d * e^{\frac{-GCD}{C_g}}$$

Waarin e = het grondgetal voor de natuurlijke logaritme is ($e = 2,718282$) en waarvoor de volgende coëfficiënten zijn geschat:

$$C_a = 1,0300393$$

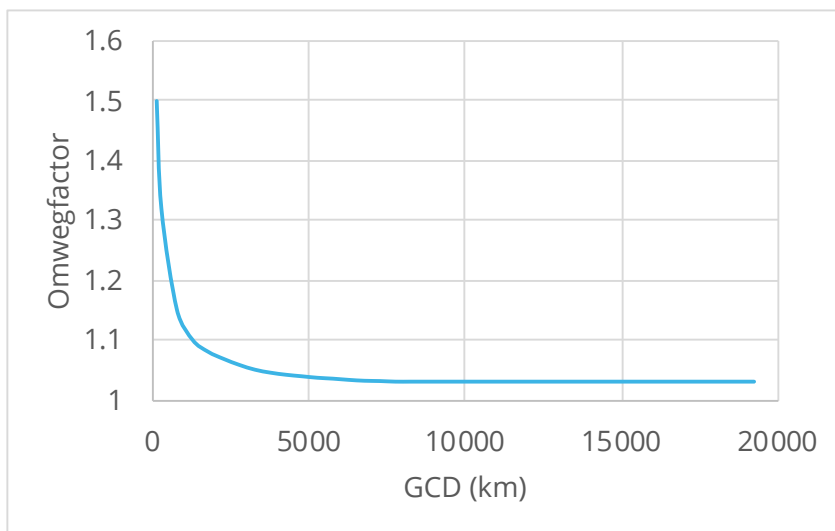
$$C_b = 0,51069922$$

$$C_c = 203,45376$$

$$C_d = 0,16773126$$

$$C_g = 1509,5793$$

De coëfficiënten zijn geschat met behulp van het software pakket *Findgraph* (Vasilyev, 2013). Onderstaande curve kwam daaruit met de beste fit, een zogenaamde *Exponential Decay 5 curve*. Figuur 1 laat het resultaat van de hierboven beschreven functie zien.

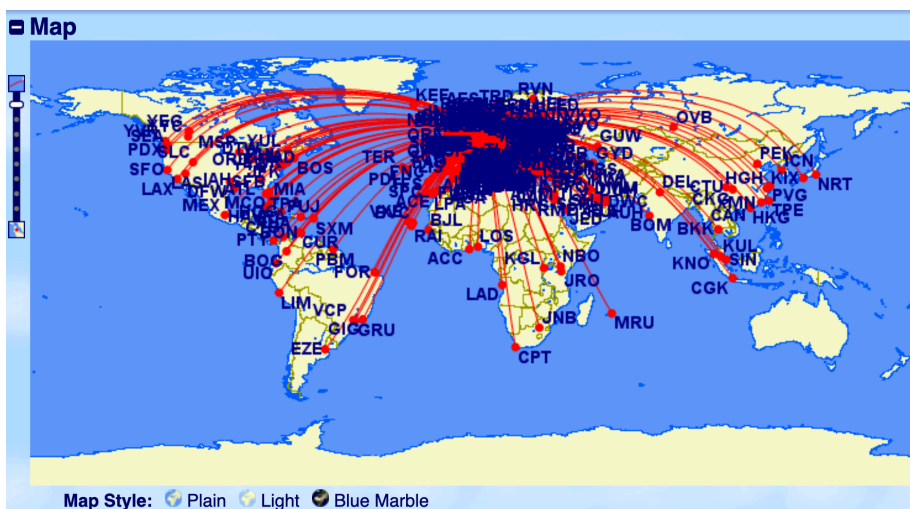


Figuur 1: de in FEM gebruikte omwegfactor als functie van de great circle distance (GCD) (Bronnen: Atmosfair, 2016; Peeters, 2018).

2.3.3 Totale emissies van de vlucht

Invoer voor het Small Emitters Tool (Eurocontrol, 2020) zijn het vliegtuigtype (de ICAO-code daarvoor) en de werkelijk gevlogen afstand. Daarom hebben we de set van in totaal 431 luchthavenparen ingevoerd in de *Great Circle Mapper* van Swartz (2020). Zie Figuur 2 voor een kaartje met alle routes.

Vervolgens is de werkelijk gevlogen afstand berekend met behulp van de omwegfactor als beschreven in 2.3.2. Alle 959 combinaties van afstanden-vliegtuigtype zijn in het SET ingevoerd. SET berekent zowel het totale brandstofgebruik van de vlucht als de totale directe CO₂-emissies (TTW) op basis van een emissiefactor van 3,15 kg CO₂/kg brandstof.



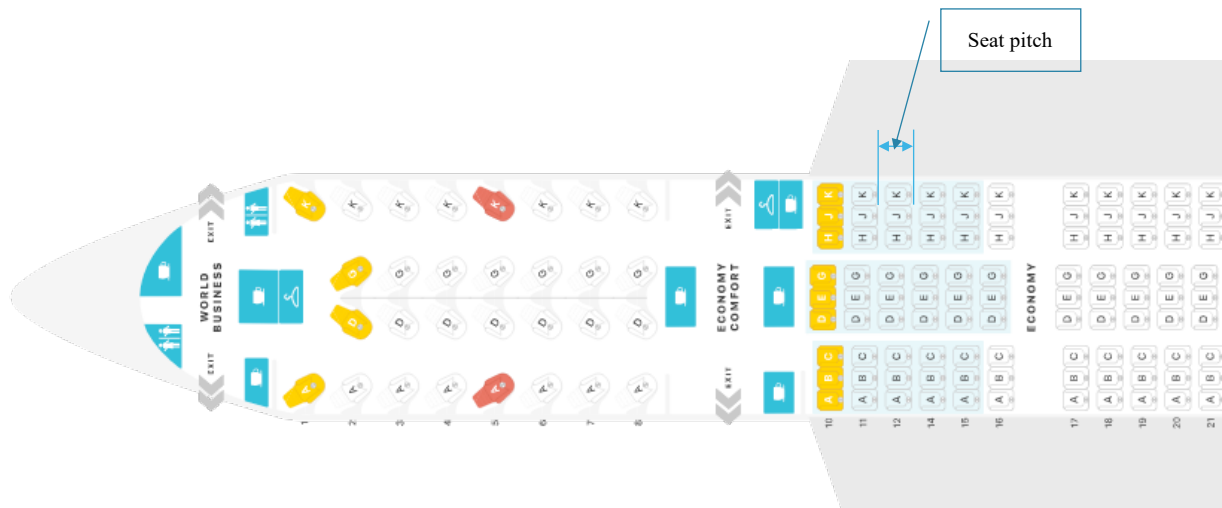
Figuur 2: overzicht van alle routes zoals die met Great Circle Mapper zijn berekend (copyright: Swartz, 2020).

2.3.4 Bepaling van toedeling per zitplaats-klasse

Bij het vervoer van passagiers is ruimte de beperkende factor voor de capaciteit. Daarom alloceren we de emissies van de passagiers per zitplaatsklasse aan de hand van het totale oppervlak dat de verschillende zitplaatsklassen innemen gedeeld door het aantal zitplaatsen van elke klasse. De

allocatie tussen passagiers en vracht gaat op basis van gewicht, omdat vracht en passagiers in verschillende ruimten zitten en gewicht bij vracht limiterend is (zie verder 2.3.5).

Om de totale ruimte per zitplaatsklasse te bepalen is per stoel een fictief oppervlak berekend op basis van de door SeatGuru gegeven *seatpitch* en het aantal stoelen per rij naast elkaar. Zie Figuur 3 met een voorbeeld van een KLM Boeing B787-1000 Dreamliner. Deze heeft drie klassen: World business (in FEM heet dat ‘Business’), Economy Comfort (in FEM is dat ‘Economy Premium’) en Economy (in FEM dus ook Economy). De *seat-pitches* zijn respectievelijk 60”, 35” en 31”. Een inch (“) is 2,54 cm.



Figuur 3: cabin layout van de KLM Boeing B787-10 (bron: SeatGuru, 2021).

De breedte van de stoelen voor Economy hebben we standaard op 18” gezet en vervolgens de relatieve breedte voor Economy Premium, Business en First berekend met de volgende formule:

$$B_{Class\ n} = B_{econ_standaard} * \frac{Rows_{economy}}{Rows_{Class\ n}}$$

De waarde van 18” is overigens voor het uiteindelijke resultaat van de berekening arbitrair omdat het berekeningsresultaat er niet door verandert omdat het om een verhouding gaat. In het geval van de KLM Boeing uit Figuur 3 kom je dan op $18'' * 9/9 = 18''$ voor Economy Premium en $18'' * 9/4 = 40.5''$ voor business.

Vervolgens is voor elke vliegtuig-luchtvaartmaatschappij combinatie de meest voorkomende cabine-indeling (in een aantal gevallen vliegt hetzelfde vliegtuigtype bij dezelfde maatschappij in verschillende configuraties), als uitgangspunt genomen om het aantal stoelen per klasse te vinden. Met dat aantal en de berekende oppervlakte van de stoelen is het totale oppervlak uitgerekend per klasse als fractie van het totale oppervlak voor alle zitplaatsklassen in het vliegtuig. De totale emissies zijn vervolgens per zitplaatsklasse met deze fractie vermenigvuldigd en gedeeld door het aantal stoelen in die zitplaatsklasse om de CO₂-emissiefactor per stoelkilometer per zitplaatsklasse te bepalen. Deze zijn echter nog niet gecorrigeerd voor eventuele *belly freight*.

2.3.5 De correctiefactor voor *belly freight*

Belly freight, vracht in de bagageruimte van een passagiersvliegtuig, komt vooral voor bij *wide-body* vliegtuigen (WB). Dat zijn vliegtuigen met twee gangpaden en een overcapaciteit in het

bagageruim. Voor het toerekenen van het aandeel van de CO₂-emissies van een vlucht aan *belly freight* worden verschillende methoden toegepast met elk hun eigen voor- en nadelen.

Voor de STREAM passagiersvervoerstudie (Otten et al., 2014) is deze toerekening gedaan op basis van gewicht. Daarbij is aangenomen dat elke passagier plus bagage 100 kg weegt en van een gemiddeld gewicht van *belly freight* per type vliegtuig van de KLM in die studie. Dat zijn dus de Embreer E190 voor de afstanden tot 700 km, de Boeing B737-800NG voor afstanden tussen 700 km en 2500 km en de Boeing B777-300ER voor de afstanden boven de 2500 km. Nadeel van deze methode is dat geen rekening wordt gehouden met de dichtheid van passagiersvervoer en met het gegeven dat een passagier een hoeveelheid extra gewicht vereist die vracht niet nodig heeft. Zo heb je catering nodig, stewardessen, pantry's, water, toiletten, stoelen, zwemvesten en ook extra ruimte voor gangpaden en 'leefruimte'. Een ander probleem is dat KLM een voorloper is op het gebied van *belly freight* (Mujica Mota et al., 2017) waardoor KLM hogere vrachtcoëfficiënten laat zien dan de gemiddelde vloot die Nederland bedient. Het aandeel van de genoemde drie vliegtuigen van KLM vertegenwoordigt ongeveer 25% van alle trips en 15% van alle CO₂-emissies. Voorts is vooral het gemiddelde gewicht aan *belly freight* voor de Embreer E190 waarschijnlijk te hoog omdat dat met 1152 kg boven de 1000 kg ligt die KLM op haar eigen aanbod voor dat vliegtuig beschrijft⁴. Door deze bezwaren krijgt *belly freight* een (te) hoog aandeel van de emissies toebedeeld en zijn de emissiefactoren voor passagiers te laag.

In onze studie sluiten we aan bij de internationaal geaccepteerde methode van ICAO zoals die ook is toegepast in de recente STREAM studie naar goederenvervoer (Klein et al., 2021). Deze methode rekent 100 kg per passagier plus bagage, maar telt daarbij ook nog eens 50 kg per stoel op voor al die andere dingen die passagiersvluchten vereisen. De ICAO-methode komt erop neer dat het gewicht voor passagiers en per stoel wordt gedeeld door de som van het gewicht van passagiers, per stoel en het gewicht van *belly freight*. Zo ontstaat een factor kleiner dan of gelijk aan 1.0, waarmee de emissies van het vliegtuig worden vermenigvuldigd om daarmee de emissies per stoelkilometer en per passagierskilometer te berekenen. Het FEM maakt dus gebruik van deze methode volgens Klein et al. (2021), die ook wordt aanbevolen door ICAO en IATA.

De *World Air Transport Statistics* (WATS) van IATA (2020) bevat data over het vervoer van 58 van de 97 luchtvaartmaatschappijen in FEM, waarmee 95% van alle vluchten in FEM is gedekt. Het FEM deelt alle *belly freight* toe aan WB-vliegtuigen omdat die in NB-vliegtuigen aanzienlijk minder voorkomen zoals cijfers in Appendix A van ICAO (2014) laten zien (doorgaans zou je 1% van de emissies aan vracht moeten toerekenen voor NB-vliegtuigen en zo'n 9-27% bij WB-vliegtuigen).

De berekening van de vrachtfactor is derhalve als volgt gedaan:

1. Bereken met behulp van de gegevens uit de WATS de hoeveelheid *belly freight* in tonkilometers voor elke luchtvaartmaatschappij.
2. Bereken de vrachtfactor als volgt:

$$C_{vracht} = \frac{N_{pax} * W_{pax} + N_{seats} * W_{seats}}{N_{pax} * W_{pax} + N_{seats} * W_{seats} + W_{belly freight}}$$

Waarin:

C_{vracht} = De correctiefactor voor *belly freight* (in feite het aandeel van de opbrengst van de vlucht dat van betalende passagiers komt).

N_{pax} = Aantal passagier gemiddeld per vlucht per luchtvaartmaatschappij

W_{pax} = 100 kg (ICAO-methode)

N_{seats} = Aantal passagier gemiddeld per vlucht per luchtvaartmaatschappij

W_{seats} = 50 kg (ICAO-methode)

⁴ https://www.afklcargo.com/NL/en/common/about_us/fleet.jsp.

$W_{belly\ freight}$ = Gemiddelde hoeveelheid *belly freight* in WB vliegtuigen per luchtvaartmaatschappij op basis van WATS-data.

Het gemiddelde van C_{vracht} voor de 58 luchtvaartmaatschappijen in de WATS die ook in FEM voorkomen is 0.821 (zie Tabel 3). We hebben deze berekening voor elk van de 58 luchtvaartmaatschappijen, waarvoor de juiste gegevens beschikbaar zijn in de WATS, afzonderlijk uitgevoerd. Voor de overige luchtvaartmaatschappijen zijn we uitgegaan van het gemiddelde van die 58 luchtvaartmaatschappijen.

Tabel 3: De invoergegevens voor de 58 in zowel FEM als WATS voorkomende luchtvaartmaatschappijen berekening van de gemiddelde vracht-factor.

Onderwerp	Waarde	Bron
<i>Belly freight</i> per pkm (kg/pkm)	44,1	Op basis van data uit IATA (2020)
Aandeel van passagierskilometers in WB	57,3%	Op basis van data uit IATA (2020)
$C_{vracht\ default}$	0,79	Berekend met bovenstaande formule

2.3.6 De bezettingsgraad

De bezettingsgraad is per luchtvaartmaatschappij uit de WATS (IATA, 2020) gehaald, zie 3.3. De WATS bevat de benodigde data voor 85 van de 97 luchtvaartmaatschappijen die in FEM voorkomen. Op basis van jaarverslagen en openbare gegevens in bijvoorbeeld Statista, is het gelukt om gemiddelde bezettingsgraden voor alle luchtvaartmaatschappijen in FEM in te voeren. De naar aantal stoelen per vlucht gewogen gemiddelde bezettingsgraad voor alle vluchten is 87,7%. Deze is verder niet gedifferentieerd naar zitplaatsklasse omdat daarover geen openbare data beschikbaar zijn.

2.3.7 Berekening van gemiddelde

Om de gemiddelde emissiefactoren te berekenen hebben we de emissiefactoren per vlucht gewogen naar het aantal stoelen op die vlucht. Deze weging is essentieel omdat de kans dat je in een bepaald vliegtuig terecht komt afhangt van het aantal stoelen dat daarvoor wordt aangeboden op de Nederlandse luchthavens. Een voorbeeld: stel dat er tussen Amsterdam en Madrid tien vliegtuigen per dag met 50 stoelen starten vanaf Schiphol en ook tien met 500 stoelen en beiden vliegen met 75% bezettingsgraad gemiddeld. Die kleine vliegtuigen hebben een gemiddelde emissiefactor van 0,10 kg/pkm en die grote van 0,08 kg/pkm. Wanneer je de vluchten zou midden dan krijg je 0,09 kg/pkm. Maar in werkelijkheid is dat natuurlijk veel lager, namelijk 0,082 kg/pkm, omdat er tien keer zoveel mensen in die grote vliegtuigen zitten dan in die kleine. De omvang van de vliegtuigen varieert nogal per afstandsklasse met meer kleine vliegtuigen op de korte afstanden en grote op de lange. Het ongewogen gemiddelde voor CO₂-emissies per passagierskilometer over alle vluchten in FEM komt op basis van het gewone gemiddelde op 0,104 kg/pkm uit, terwijl het gewogen gemiddelde 0,0944 kg/pkm is. Weging is toegepast voor alle emissiefactoren, bezettingsgraden, totale vluchtemissies en gemiddelde afstanden.

3 Databases

3.1 FlightRadar24

De berekeningen in dit rapport zijn gebaseerd op data van FlightRadar24 (FlightRadar24, 2021). FlightRadar24 (FR24) verzamelt al vele jaren van alle vliegtuigen met een transponder gegevens over hoogte, snelheid, koers, vliegtuigtype, vliegtuigregistratie, luchtvaartmaatschappij, herkomst, geplande bestemming en daadwerkelijke bestemming. De website geeft standaard de positie en herkomst en bestemming van alle vliegtuigen op een kaart. FlightRadar biedt tegen betaling de mogelijkheid om data uit het verleden op te vragen. De door ons gekochte FR24 database bevat per vlucht de volgende gegevens (in grijs font de gegevens die *niet* gebruikt zijn in FEM):

- flight_id: een FR24 nummer voor de vlucht
- aircraft_id: een FR24 code voor het gebruikte vliegtuig
- reg: de registratie van het vliegtuig
- equip: de ICAO code van het gebruikte vliegtuig
- callsign: een code bestaande uit de 3-letter-code voor de luchtvaartmaatschappij en een aanvullende indicatie van de vlucht (vaak maar niet altijd het vluchtnummer)
- flight: het vluchtnummer
- schd_from: de ICAO-code voor de vertrekluchthaven
- schd_to: de ICAO-code voor de geplande bestemmingsluchthaven
- real_to: de ICAO-code voor de werkelijke bestemmingsluchthaven

Voor deze studie hebben we vluchtdata voor zeven representatieve dagen verspreid over 2019 aangekocht. We hebben daarbij gezocht naar dagen met een variatie aan verkeer, een verspreiding over de seizoenen en dagen van de week en alleen voor dagen zonder noemenswaardige incidenten of bijzondere (weers-)omstandigheden. Tabel 4 geeft een overzicht van de dagen in de database. Het aantal vluchten is het totaal aantal (relevante) vluchten vanaf de betreffende luchthavens. Zoals is te zien was de drukste dag in augustus, maar varieert het aantal vluchten niet heel erg veel over de dagen. Uit data van het CBS met vluchten per maand (CBS, 2020) blijkt ook dat de variatie per maand relatief gering is. Dit verhoogt de representativiteit van de gekozen dagen.

Tabel 4: Overzicht van de dagen met vluchten.

Date	Day	Maand	Aantal vluchten vanaf de 5 luchthavens
20190514	Dinsdag	Mei	775
20190601	Zaterdag	Juni	722
20190606	Donderdag	Juni	805
20190717	Woensdag	Juli	806
20190804	Zondag	Augustus	797
20190830	Vrijdag	Augustus	824
20191028	Maandag	Oktober	744
TOTAAL			5.473

De oorspronkelijke data van FR24 bevatten niet alleen alle vluchten van en naar *alle* Nederlandse luchthavens, maar ook alle vluchten die door het luchtruim van Nederland vlogen. Daarom hebben we eerst alle vertrekkende vluchten vanaf Schiphol (AMS), Rotterdam-The Hague Airport (RTM),

Eindhoven Airport (EIN), Groningen Airport (GRQ) en Maastricht-Aachen Airport (MST) geselecteerd. Vervolgens zijn daar alle binnenlandse vluchten, zakenjets, privévliegtoegen, helikopters, en *full freighter* vrachtoegen uitgehaald. Zo bleven er 5.473 vluchten over. De database bevat de volgende verdelingen over vliegtuigen, luchtvaartmaatschappijen, luchthavens, bestemmingen, etc.:

- 43 vliegtuigtypes, uiteenlopend van de oudere B747-400 tot en met de nieuwste A321Neo en B737-9.
- De volgende luchthavens (aantal vertrekkende vluchten):
 - AMS (4.780)
 - EIN (423)
 - GRQ (14)
 - MST (51)
 - RTM (205)
- 97 luchtvaartmaatschappijen (aantal vluchten) waarvan de tien grootste:
 - KLM (2.507)
 - Transavia Holland (698)
 - easyJet (372)
 - Ryanair (208)
 - TUI fly Netherlands (141)
 - Delta Air Lines (139)
 - Vueling Airlines (83)
 - Wizz Air (80)
 - British Airways (76)
 - Lufthansa (76)
- 304 bestemmingen met als belangrijkste:
 - Londen Heathrow (LHR, 126)
 - London City Airport (LCY, 108)
 - Barcelona (BCN, 100)
 - Dublin (DUB, 95)
 - Wenen (VIE, 81)
 - Parijs Charles de Gaulle (CDG, 81)
 - Kopenhagen (CPH, 80)
 - Frankfurt (FRA, 80)
 - Manchester (MAN, 77)
 - München (MUC, 76)

3.2 Small Emitters Tool

Om de CO₂-emissies te berekenen is gebruik gemaakt van het Small Emitters Tool (SET) dat ontwikkeld is om luchtvaart CO₂-emissies ten behoeve van het Europese Emission Trading System (ETS) te kunnen berekenen (Eurocontrol, 2020). Dit model bevat honderden vliegtuigtypen en berekent op basis van het type en de werkelijk gevlogen afstand, het totale brandstofverbruik en de totale emissies van de vlucht (TTW) voor de vlucht met dat vliegtuigtype. Het model gebruikt een realistisch brandstofverbruik waar impliciet ook gemiddelde operationele effecten in zitten (zie ook paragraaf 2.2). Ook levert het SET de bij de verbranding ontstane CO₂-emissies op basis van een standaard emissiefactor van 3,15 kg CO₂/kg brandstof (Eurocontrol, 2020). Het model bepaalt geen andere broeikasgasemissies.

3.3 Aanvullende data

3.3.1 Zitplaatsklassen, cabine-indeling en aantal stoelen

Het aantal stoelen per klasse en de ruimte per stoel (seat-pitch en aantal stoelen per rij), per vliegtuig en per luchtvaartmaatschappij is zoveel mogelijk gebaseerd op SeatGuru (2021). Waar dergelijke gegevens niet in deze bron voorkomen, is gebruik gemaakt van andere websites zoals SeatMaestro (2021) en, wanneer ook dat geen betrouwbare gegevens opleverde, van de websites van de luchtvaartmaatschappijen, Wikipedia of op basis van bronnen elders op het internet.

3.3.2 World Air transport Statistics (WATS)

IATA, de internationale brancheorganisatie van luchtvaartmaatschappijen, publiceert jaarlijks een grote database met allerhande gegevens over luchtvaartmaatschappijen die lid zijn van IATA. Daaronder vallen gegevens over:

- Aantallen reguliere en charter passagiers
- Passagierskilometers
- Capaciteit in stoelkilometers
- Tonkilometers vracht
- Vliegtuigkilometers

Op basis van de WATS zijn de bezettingsgraad (zie 2.3.6) en de *belly freight* factor (2.3.5) berekend voor >98% van alle vluchten in FEM.

3.3.3 Overigen

Voorts is van een groot aantal andere bronnen gebruik gemaakt, met name voor conversies tussen coderingssystemen voor de verschillende vliegtuigtype en luchtvaartmaatschappijen coderingen, de aantallen stoelen per zitplaatsklasse voor specifieke vliegtuigtype-luchtvaartmaatschappij-combinaties, voor de verdeling over prijsvechters en andere maatschappijen, en commerciële gegevens van in de WATS ontbrekende luchtvaartmaatschappijen in verband met bezettingsgraad en *belly freight*. Hieronder de belangrijkste:

- **Diverse websites** met conversies voor IATA en ICAO vliegtuig- en luchtvaartmaatschappijcodes. De start was een zeer uitgebreide Wikipedia pagina (Wikipedia, 2021b) waaruit een tabel met ruim 6.000 luchtvaartmaatschappijen, hun naam, IATA- en ICAO-codes kon worden gedestilleerd. Daarmee konden in het model de meeste coderingen worden omgerekend (WATS gebruikt IATA, FR24, SeatGuru en Seatmaestro ICAO). Daarnaast is gebruik gemaakt van www.avcodes.co.uk (2021) waarin je door het intypen van één code een overzicht van alle codes en andere gegevens van de betreffende luchthaven krijgt. Omdat we aanvankelijk met meer dan honderd luchtvaartmaatschappijen te doen hadden, hebben we de downloadable tabel van Wikipedia als hoofdbron gebruikt bij twijfel de tweede geraadpleegd.
- **ICAO lijst:** de indeling tussen prijsvechters (LCC = low-cost carriers) en gewone luchtvaartmaatschappijen is gemaakt op basis van een lijst van ICAO (ICAO, 2017) en voor enkele nieuwere maatschappijen met behulp van Wikipedia. De definitie van een LCC is “*an air carrier that has a relatively low-cost structure in comparison with other comparable carriers and offers low fares and rates. Such an airline may be independent, the division or subsidiary of a major network airline or, in some instances, the ex-charter arm of an airline group*” (ICAO, 2009, p. 2). Zie verder 4.2 voor een nadere toelichting op het LCC-verschijnsel.

- ***Additionele gegevens*** over de volgende luchtvaartmaatschappijen zijn gehaald uit jaarverslagen en andere internetbronnen over 2019. Het gaat om TUIfly Netherlands, Wizz Air, Corendon Dutch Airlines, Alitalia, Level Europe GmbH, Norwegian Air Shuttle, Air Arabia Maroc, easyJet Switzerland, easyJet Europe, Transavia Holland, easyJet UK en Flybe.

4 Resultaten

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van het onderzoek. Het doel daarvan is allereerst om antwoord op de hoofdvraag van het onderzoek te kunnen geven, maar ook om te laten zien hoe complex die emissiefactoren van de luchtvaart zijn, welke parameters het meeste effect hebben en om op basis daarvan aanbevelingen te doen die verder gaan dan het communiceren van een handvol geaggregeerde CO₂-emissiefactoren. Zo bespreken we ook enkele functies die een beste curve fit vormen voor de CO₂-emissiefactor als functie van de GCD. Dergelijke functies leveren de meest precieze emissies en kunnen goed worden toegepast in websites met carbon footprint calculators. Ook voor bedrijven met een reisbeleid zijn dergelijke curves prima toe te passen als men toch al de afstanden van elke vlucht heeft opgezocht om de vlucht in de juiste afstandsklasse te plaatsen.

We onderscheiden twee sets van emissiefactoren:

- Per stoelkilometer (skm)
- Per passagierskilometer (pkm)

De eerste is een eigenschap van het vliegtuig en de inrichting (aantal stoelen, verdeling over de zitplaatsklassen), de tweede is ook afhankelijk van de operationele efficiency van een luchtvaartmaatschappij: de bezettingsgraad. De twee zijn als volgt met elkaar verbonden:

$$E_{pkm} = \frac{E_{skm}}{\eta_b}$$

Waarin:

E_{pkm} = CO₂-emissiefactor per passagierskilometer (kg CO₂/pkm)

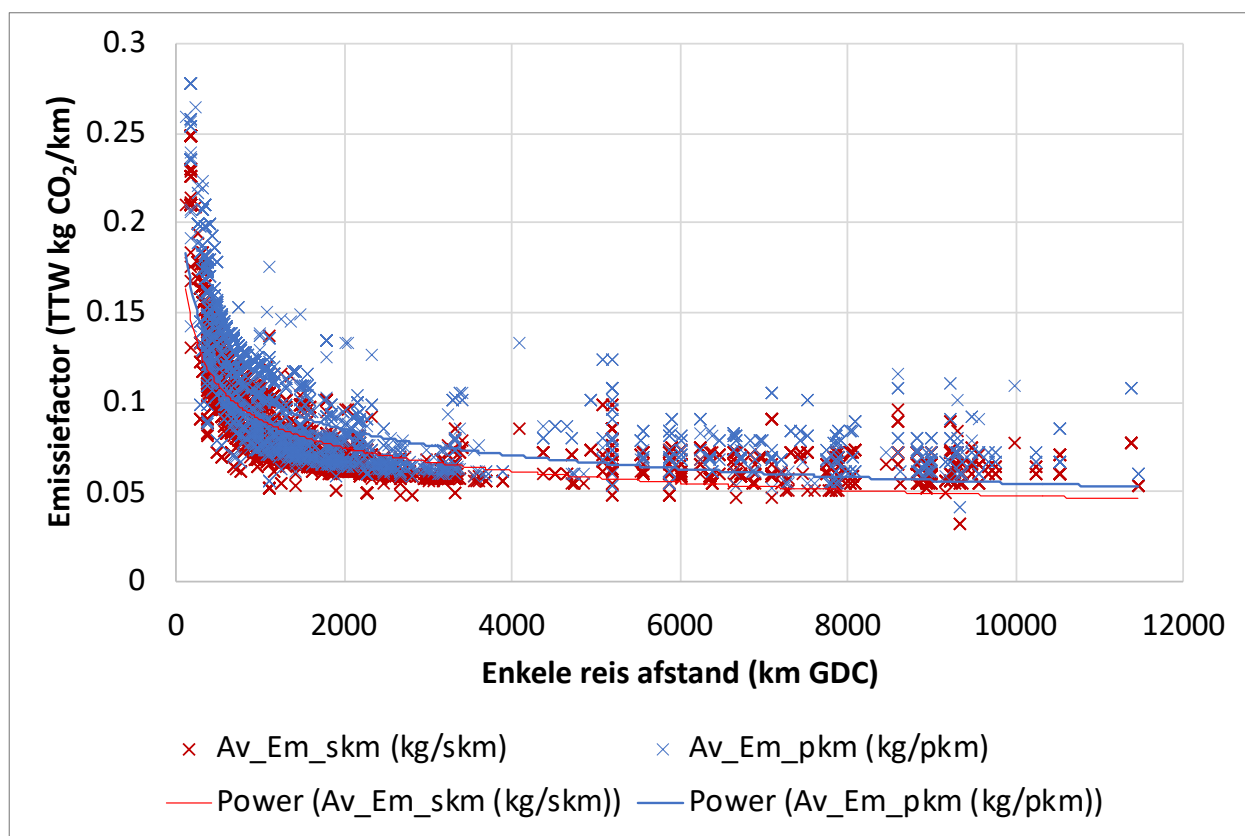
E_{skm} = CO₂-emissiefactor per stoelkilometer (kg CO₂/skm)

η_b = Bezettingsgraad van de stoelen

We beginnen met een globaal overzicht van de resultaten om gevoel te krijgen voor de relaties tussen de verschillende vluchtparameters en de CO₂-emissiefactoren (4.2). In paragraaf 4.3 zijn de nieuwe CO₂-emissiefactoren per afstandsklasse te vinden, plus een vergelijking met de huidige emissiefactoren (CO₂emissiefactoren.nl, 2021). Paragraaf 4.4 beschrijft de gehele nieuwe set CO₂-emissiefactoren inclusief een verdeling over zitplaatsklassen en 4.5 de emissiefactoren als functie van de afstand (GCD).

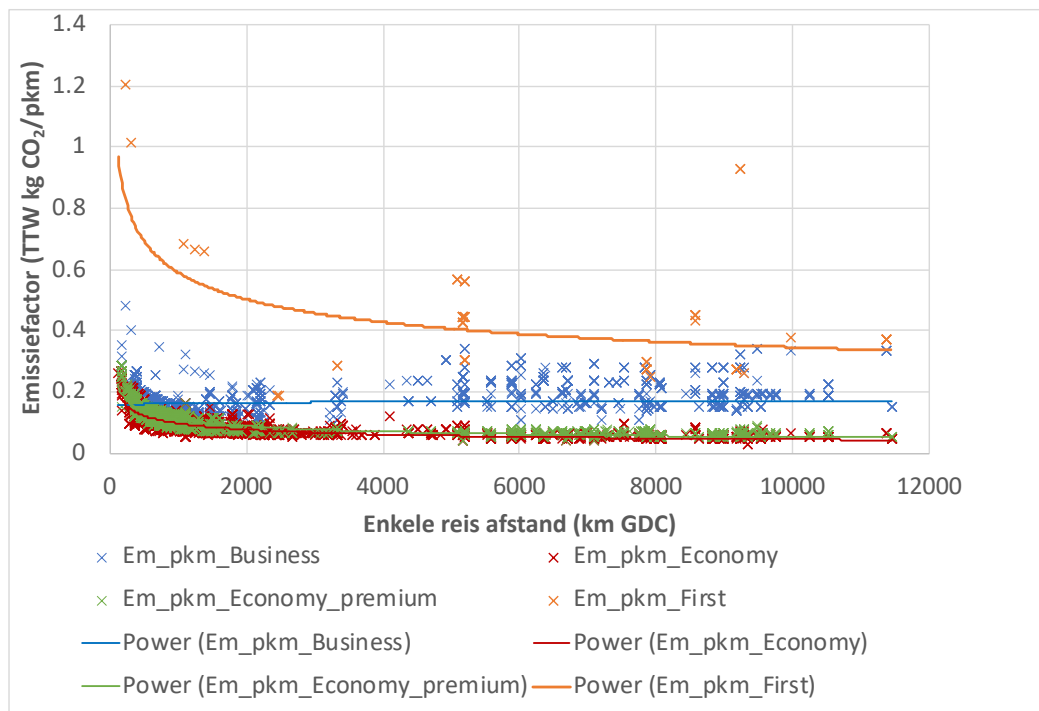
4.2 Overzicht belangrijkste resultaten

Voor alle zitplaatsklassen samen krijgen we de gemiddelde emissiefactoren als functie van de afstand zoals weergegeven in Figuur 4. De grafiek laat duidelijk het grote effect van afstand op de CO₂-emissiefactor (TTW) zien. Zoals verwacht zijn de emissiefactoren per stoelkilometer lager dan die per passagierskilometer. De trendlijnen zijn ter illustratie van de trend de *ongewogen* powercurves gegenereerd met Excel. Deze trendlijnen zijn niet geschikt om een exact gemiddelde voor een bepaalde afstand af te lezen (zie daarvoor 4.5.3). De weegmethode is te vinden in 2.3.7. Bij afstanden tot enkele honderden kilometers kan de CO₂-emissiefactor per stoelkilometer bijna drie keer hoger zijn dan het gewogen gemiddelde van 0,0828 kg/skm voor alle afstanden samen. Voor de factoren per passagierskilometer geldt dat het maximum 2,8 keer groter is dan het gewogen gemiddelde van 0,0944 kg/pkm.



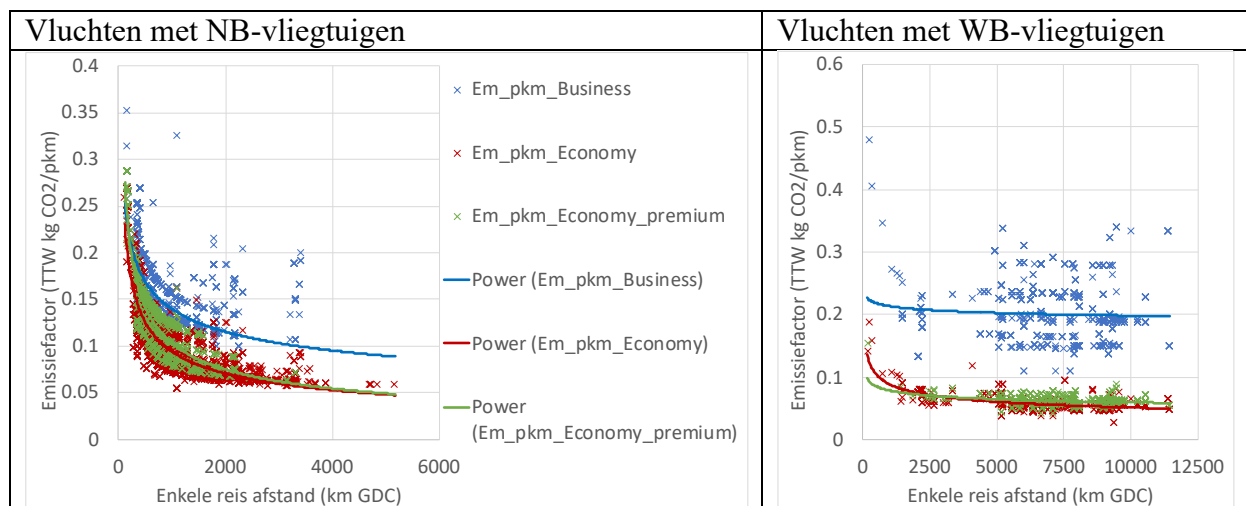
Figuur 4: vergelijking van de TTW CO₂-emissiefactoren per stoelkilometer en per passagierskilometer. Noot: de trendlijnen zijn ongewogen simpele powercurves uit Excel ter illustratie van de trend niet om een gemiddelde voor een bepaalde afstand op te zoeken.

Figuur 5 geeft de berekende emissiefactoren per passagierskilometer voor TTW (directe) CO₂-emissies voor het gehele bestand aan vluchten. Omdat stoelen in de *Economy Class* de minste ruimte innemen, zijn daar de emissiefactoren het laagst, die voor *Economy Premium Class* iets hoger en die voor *Business Class* en met name *First Class* aanzienlijk hoger.



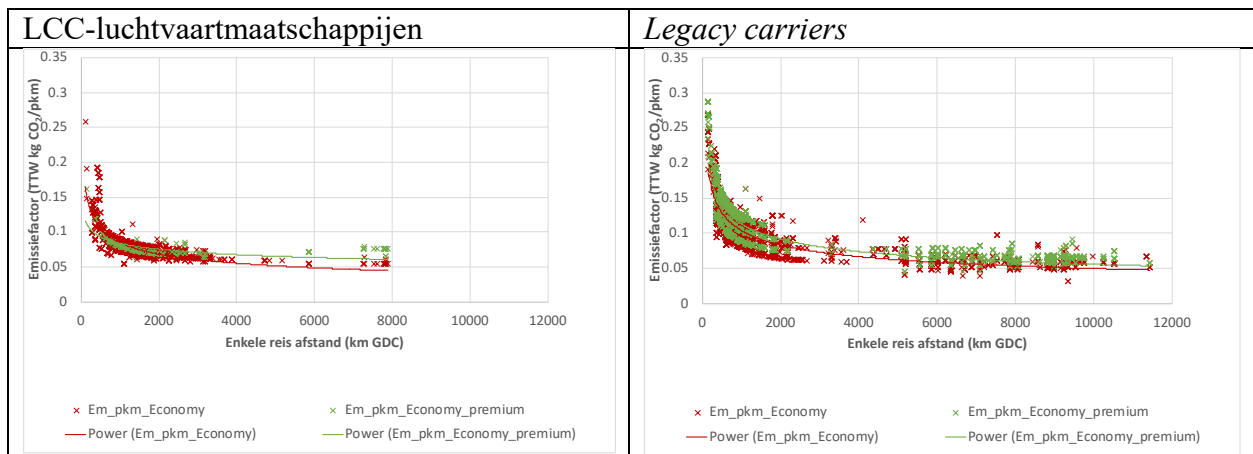
Figuur 5: Overzicht van TTW CO₂-emissiefactoren voor alle berekende vluchten. Noot 1: een groot aantal vluchten is gelijk (bv AMS-LHR, B738, KLM) en al deze punten staan in de grafiek maar vallen precies over elkaar. Noot 2: de trendlijnen zijn ongewogen simpele powercurves uit Excel ter illustratie van de trend, niet om een gemiddelde voor een bepaalde afstand op te zoeken.

Bovendien valt op dat de te verwachten afname van de emissiefactor met de afstand, zoals goed te zien bij de drie andere zitplaatsklassen en voor de gemiddelden, voor *Business Class* niet optreedt. Dit heeft alles te maken met de grote ruimte die *Business Class* de reiziger in langeafstandsvliegtuigen (zoals de A330, B787 of B747, zogenaamde *wide-body aircraft*; WB) biedt vergeleken met de vaak tamelijk marginale verschillen tussen *Business* en *Economy Class* bij korte afstandsvliegtuigen (zoals de A320 of B737, zogenaamde *narrow-body aircraft*; NB). Figuur 6 laat de resultaten zien gesplitst voor NB- en WB-vliegtuigen en illustreert dit verschil.



Figuur 6: TTW CO₂-emissiefactoren voor de NB- en WB-vliegtuigen vergeleken. Noot: de trendlijnen zijn ongewogen simpele powercurves uit Excel ter illustratie van de trend, niet om een gemiddelde voor een bepaalde afstand op te zoeken.

Ten slotte vergelijken we de resultaten voor prijsvechters (*low-cost carriers*; LCC) en overige ('*legacy*') luchtvaartmaatschappijen. Het LCC business model gaat uit van zo laag mogelijke kosten per stoelkilometer door het maximaal toegelaten aantal stoelen in een vliegtuig te monteren, te vliegen naar kleine vliegvelden met lage tarieven, een korte *turn-around* tijd te realiseren en weinig tot geen on-board service (catering etc.) te bieden. Voorts doen deze maatschappijen aan *yield management* (Groß & Lück, 2011). *Yield management* houdt in dat de eerste stoel van een geplande vlucht voor een extreem lage prijs wordt verkocht en de laatste juist voor een heel hoge, maar zodanig afgestemd dat vrijwel alle stoelen altijd verkocht worden (Wehner et al., 2018). Daardoor realiseren LCC's doorgaans een veel hogere bezettingsgraad dan *Legacy carriers*. Figuur 7 laat het effect van de grotere stoeldichtheid en de gemiddeld vaak wat hogere bezettingsgraad van LCC-maatschappijen op de emissiefactoren zien: LCCs hebben een fors lagere emissiefactor per pkm. Ook liggen de CO₂-emissiefactoren per pkm voor LCC-maatschappijen voor de verschillende afstanden dichter bij elkaar dan voor de *Economy Class Legacy* maatschappijen.



Figuur 7: Emissiefactoren voor de LCC- en Legacy carriers vergeleken. Noot: de trendlijnen zijn ongewogen simpele powercurves uit Excel ter illustratie.

4.3 De nieuwe emissiefactoren per afstandsklasse

In deze paragraaf geven we de factoren per afstandsklasse en vergelijken deze met de huidige factoren volgens CO2emissiefactoren.nl (2018). De op één-na-laatste kolom van Tabel 5 geeft de procentuele afwijking van de nieuwe factoren ten opzichte van de oude factoren, maar alleen voor de CO₂ van de vlucht. Daaruit blijkt dat de huidige vluchtemissies op de korte afstanden 2% te hoog zijn voor de huidige vloot, voor middenafstanden 8% overschat, maar voor de lange afstanden met 7% onderschat. Dat laatste zal voor een deel te maken hebben met de hoge emissies die wij hebben gevonden voor *Business* en *First Class*. Wanneer we de nieuwe cijfers voor ‘juist’ aannemen, dan kunnen we op basis van de gemiddelde ontwikkeling van de emissiefactoren tussen 2011 en 2019 terugrekenen wat de oude dan hadden moeten zijn. Op basis van Peeters and Middel (2007) mochten we verwachten dat de emissiefactoren tussen 2011 en 2019 met 8,4% zouden zijn afgenomen. Dit als gevolg van de continue vlootvernieuwing en technologische ontwikkeling in de luchtvaart. De laatste kolom van Tabel 5 laat zien dat de cijfers van CO2emissiefactoren.nl voor de afstanden tussen 700-2500 km volgens verwachting waren, maar voor de korte afstand 7% te laag en voor de lange afstanden 14% te laag.

Tabel 5: De nieuwe gewogen CO₂-emissiefactoren (kg/pkm) gebaseerd op het FEM en een vergelijking met de huidige factoren.

Afstandsklasse	Kg/pkm	Kg/skm	Nieuw/oud (pkm)	Gecorrigeerd oud/nieuw
<700 km	0,136	0,11961	98%	93%
700-2500 km	0,086	0,07620	92%	100%
>2500 km	0,074	0,06358	107%	86%
Gemiddeld	0,094	0,08283	n/a	n/a

4.4 Emissiefactoren per afstandsklasse en per zitplaatsklasse

Tabel 6 laat de emissiefactoren zien uitgesplitst naar afstandsklasse en zitplaatsklasse. De zitplaatsklasse heeft een grote invloed op de CO₂-emissiefactor. De laagste CO₂-emissiefactor is 59 gram/pkm voor *Economy Class* vluchten op lange afstand; de hoogste is 1.109 gr/pkm voor *First Class* op afstanden onder de 700 km, bijna twintig keer zoveel.

Tabel 6 maakt ook het belang van afstand voor de emissiefactor duidelijk: de *Economy Class* emissiefactor is bijna twee keer zo groot voor de korte afstandsklasse vergeleken met de langste. Wanneer alle luchtvaartmaatschappijen dezelfde codes of benamingen voor de zitplaatsklasse zouden hanteren, dan zou iedereen op haar of zijn ticket precies kunnen zien welke van de vier klassen gevlogen wordt. Helaas is dat niet meer het geval en kiezen veel luchtvaartmaatschappijen ervoor om voor marketing doeleinden allerlei fancy namen voor zitplaatsklassen te verzinnen. Toch is juist bij tickets via boekingssites goed aan te geven wat voor ticket men wil. Standaard staat die op *Economy Class*. Zo geven Expedia, Cheaptickets, Skyscanner, Travelocity, Orbitz en Cheapair (die noemen *Economy Class* ‘Coach’ maar de andere drie hetzelfde en deze *Coach* is de standaard instelling), de vier door ons gehanteerde zitplaatsklassen onder een keuze-knop. Daarnaast is het goed om in de communicatie met burgers en andere gebruikers kort aan te geven hoe met het verschijnsel zitplaatsklasse om te gaan.

Tabel 6: de nieuwe emissiefactoren gebaseerd op FEM en onderscheiden naar afstand en klasse voor kg/pkm (1^{ste} kolom), kg/skm (2^{de} kolom) en de bezettingsgraad (% , derde kolom).

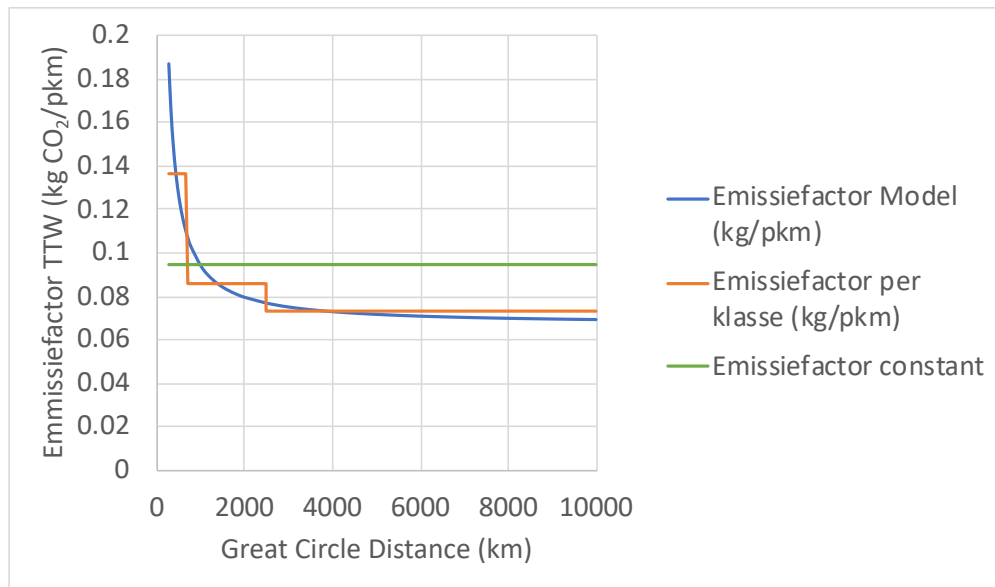
Afstand en klasse	Kg CO ₂ /pkm	Kg CO ₂ /skm	Seat occupation
<700 km	0.136	0.120	87.7%
Economy	0.127	0.111	87.7%
Economy Premium	0.153	0.135	88.6%
Business	0.180	0.158	87.6%
First	1.109	0.876	79.0%
700-2500 km	0.086	0.076	88.4%
Economy	0.081	0.072	88.5%
Economy Premium	0.094	0.085	90.8%
Business	0.135	0.118	87.5%
First	0.429	0.341	79.4%
>2500 km	0.074	0.064	86.4%
Economy	0.059	0.051	86.7%
Economy Premium	0.063	0.055	87.7%
Business	0.211	0.180	85.4%
First	0.433	0.345	79.6%
Over alle afstanden gemiddeld	0.094	0.083	87.7%
Economy	0.085	0.075	87.9%
Economy Premium	0.091	0.081	89.1%
Business	0.172	0.149	86.9%
First	0.450	0.358	79.5%

4.5 Emissiefactoren als functie van afstand

4.5.1 Vergelijking drie verschillende rekenmethodes

Ten behoeve van CO₂ rekenmodellen geven we hier uit de data afgeleide formules om de TTW CO₂ emissie per pkm te berekenen voor de verschillende zitplaatsklassen en het gewogen

gemiddelde voor alle zitplaatsklassen samen. We hebben daarvoor gebruik gemaakt van de techniek *curve fitting* en steeds de vergelijking gekozen die een hoge R^2 heeft (dat wil zeggen waar de resultaten van de formule het dichtst bij de berekende CO₂-emissiefactoren ligt) en een niet al te complexe, continue functie oplevert. De FindGraph software (Vasilyev, 2013) biedt meer dan duizend verschillende formules aan en rekt die zo nodig allemaal door om zo de best scorende formules te vinden.



Figuur 8: De verschillen in emissiefactoren afhankelijk van het detail van het model waarmee de emissiefactoren worden berekend. Het gaat om gewogen gemiddelden voor vlucht CO₂-emissies voor alle zitplaatsklassen samen.

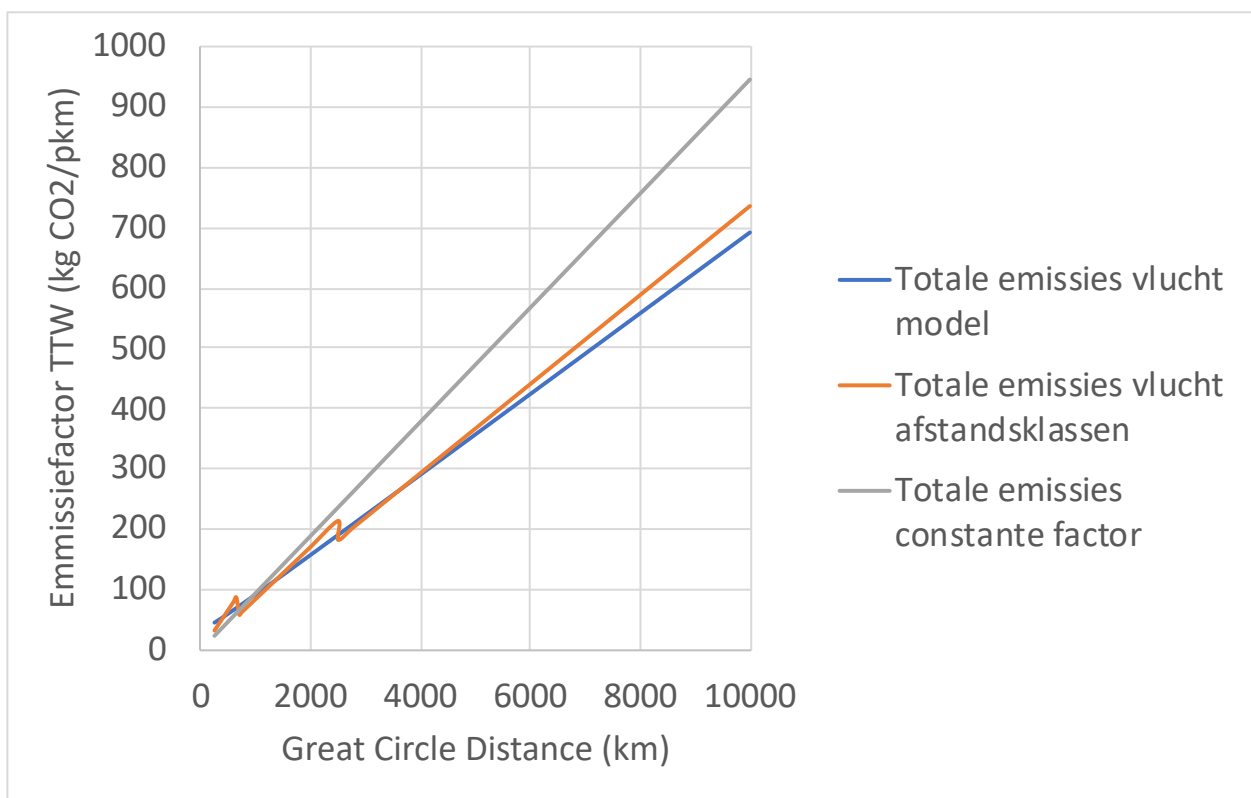
Figuur 8 laat de verschillen zien tussen een constante emissiefactor voor alle afstanden, voor de drie gekozen afstandsklassen en voor een formule die de gemiddelde emissiefactor als functie van de afstand (GCD) exact berekend gebaseerd op een regressieanalyse. Zie 4.5.3 voor de verschillende formules. De figuur laat duidelijk zien dat één gemiddelde emissiefactor een overschatting oplevert voor alle afstanden boven de 1.000 kilometer. Met drie afstandsklassen zijn de afwijkingen van de berekende lijn minder maar nog steeds goed zichtbaar.

4.5.2 Van emissiefactoren naar emissies

Vaak wordt beweerd dat lange vluchten milieuvriendelijker zijn dan korte vluchten. Dat is niet juist. Wat wel vaak het geval is, is dat de emissies per passagierskilometer voor een lange vlucht wat lager liggen dan voor een korte vlucht. Maar uiteraard geldt gewoon dat elke extra kilometer die je aflegt leidt tot méér emissies (zie ook tekst box “Verre reizen milieuvriendelijker?”). De totale CO₂-emissie van de hele vlucht neemt continue toe met de afstand. Figuur 9 laat dit alsmaar toenemen van de totale vlucht CO₂-emissies duidelijk zien. Dit maakt duidelijk dat de efficiëntie van een vlucht maar een klein deel van de totale emissies van de vlucht bepaalt.

Verre reizen milieuvriendelijker?

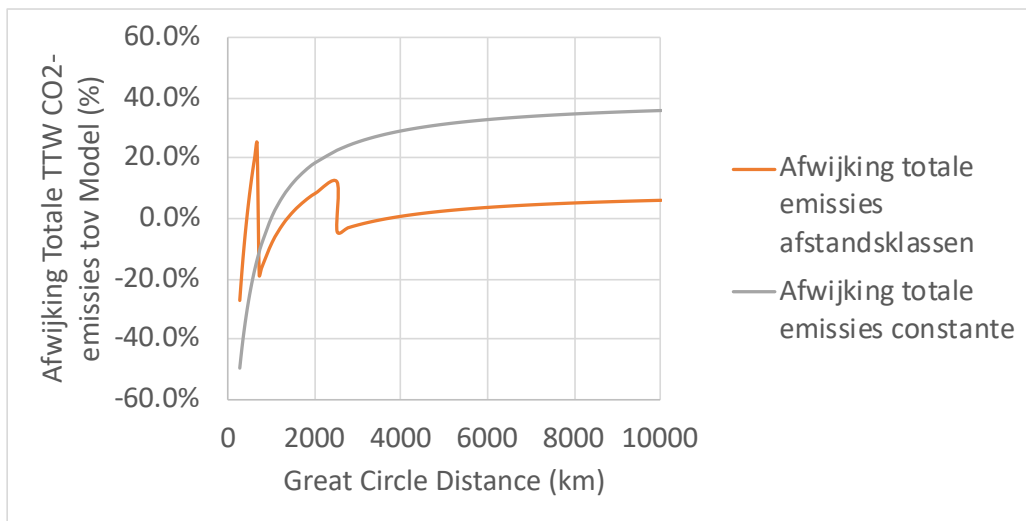
Hoewel de emissiefactoren beter worden met het toenemen van de afstand, betekent dit natuurlijk niet dat bijvoorbeeld de totale emissies van een lange *Economy Class* vlucht ook lager zijn dan die van een korte vlucht met *First Class*. De gemiddelde *Economy Class* vlucht in de afstandsklasse boven de 2.500 km, heeft een afstand van gemiddeld 7.000 km en veroorzaakt 406 kg CO₂. De *First Class* vlucht in de afstandsklasse tot 700 km heeft een gemiddelde afstand van 470 km en levert dan 533 kg, dus nog maar 30% meer in plaats van 1.900%. Als je binnen één zitplaatsklasse kijkt, dan ga je bijvoorbeeld voor *Economy Class* van gemiddeld 64 kg voor een vlucht in de laagste afstandsklasse, naar gemiddeld 515 kg, acht keer zoveel, in de hoogste afstandsklasse, terwijl die vlucht in de hoogste afstandsklasse 47% zuiniger was dan in de kortste afstandsklasse. Dit illustreert het gevaar van het 'duurzaam' labelen van efficiënte(re) producten, zonder tegelijk ook het volume van de consumptie mee te wegen. In communicatie naar consumenten en bedrijven is het erg belangrijk vooral de totale emissies te benadrukken en niet in de valkuil van alleen maar efficiency te stappen.



Figuur 9: De TTW CO₂-emissies van een vlucht als functie van de GCD-afstand voor de drie methodes.

Ook is zichtbaar dat forse afwijkingen kunnen ontstaan wanneer niet van het exponentiële model wordt uitgegaan maar van de drie gemiddelden voor de afstandsklassen en dat rond de afstandsklassengrenzen het verschijnsel optreedt dat een iets grotere afstand opeens een lagere totale vluchtemissie zou veroorzaken. Dit is in de praktijk onmogelijk. Figuur 10 laat deze

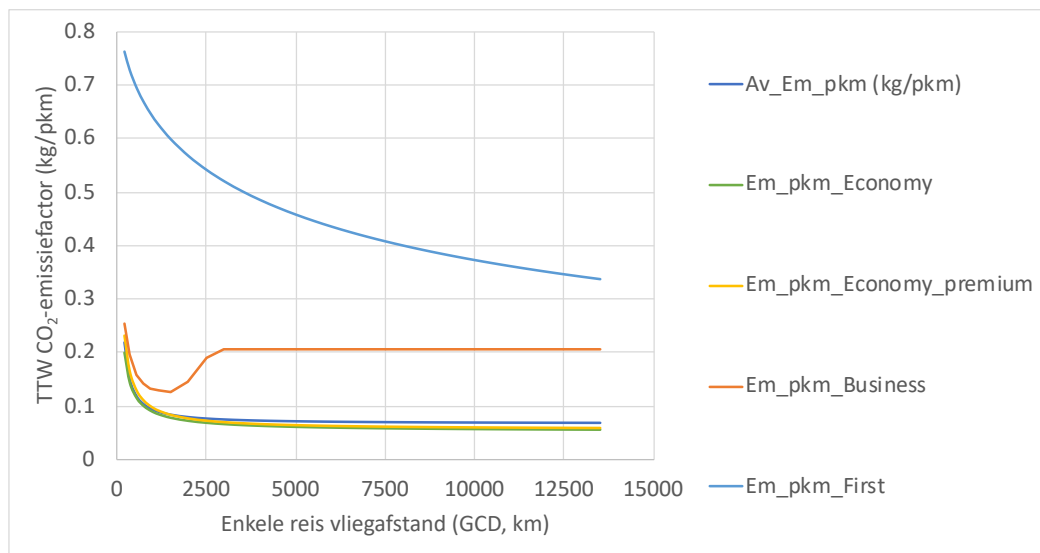
afwijkingen in emissiefactoren bij de verschillende methoden duidelijk zien. Wanneer voor één constante voor alle afstanden wordt uitgegaan, ontstaan er in de totale vluchtemissies afwijkingen van -50% tot +27%. Bij de keuze voor drie afstandsklassen is alleen de hoogste klasse min of meer juist, maar ontstaan onder de 2.500 km, waar volgens de data in FEM verreweg 70% van de vluchten wordt gemaakt, afwijking van -27% tot +25%.



Figuur 10: De afwijking als gevolg van een aangenomen constante CO₂-e missiefactor voor alle afstanden en van de drie constante factoren per afstandsklasse.

4.5.3 De exponentiële modellen

Voor de CO₂-emissiefactoren per passagierskilometer hebben we vijf exponentiële curves gefit. Deze zijn voor het berekenen van de gemiddelde TTW CO₂-emissiefactor en voor het berekenen van de TTW emissiefactoren van de vier zitplaatsklassen afzonderlijk. Figuur 11 laat het resultaat zien. Bij de businessclass ontstaat een trendbreuk tussen de 2.000 en de 2.610 km. De trendbreuk wordt veroorzaakt doordat op de korte afstanden de NB-vliegtuigen sterk domineren en op lange afstanden de WB-vliegtuigen domineren. De WB toestellen worden veel ruimer ingericht voor de *Business Class* dan de NB-vliegtuigen. Daarom zijn twee formules nodig voor *Business Class*: eentje voor <2.610 km GCD en eentje voor daarboven te schatten.



Figuur 11: De vijf gemodelleerde TTW-emissiefactoren als functie van de afstand. De curves zijn gewogen naar het aantal zitplaatsen per vlucht.

De gemiddelde CO₂-emissiefactor per pkm

De beste fit voor de naar aantal stoelen gewogen gemiddelde CO₂-emissiefactor per pkm ontstaat met een Sigmoid (MMF) model. Deze heeft de volgende vorm:

$$EF_{Av} = \frac{(C_a * C_b + C_c * D_{GCD}^{C_d})}{(C_b + D_{GCD}^{C_d})} \quad (\text{kg CO}_2/\text{pkm})$$

Waarin:

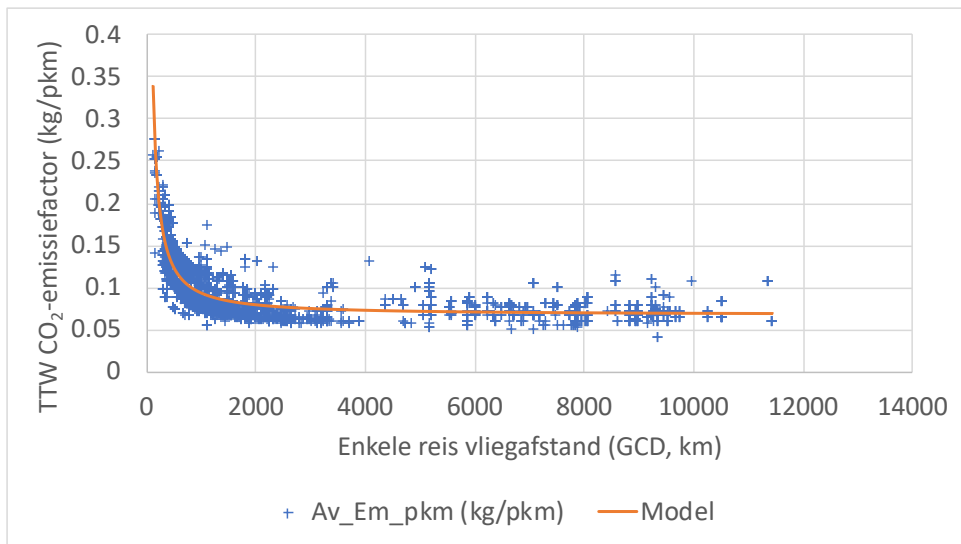
EF_{av} = de gemiddelde CO₂-emissiefactor in kg/pkm

$C_a = 13,556445$

$C_b = 3,9236958$

$C_c = 0,067287563$

$C_d = 1,1023186$



Figuur 12: Data en model voor de naar aantal zitplaatsen gewogen gemiddelde TTW CO₂-factor per pkm ongeacht de zitplaatsklasse.

Om de emissies per stoelkilometer te berekenen, moet het resultaat van de formule vermenigvuldigd worden met de bezettingsgraad. Deze is voor de gemiddelde CO₂-emissiefactor 87,7%.

De CO₂-emissiefactor per pkm voor Economy Class

Ook in dit geval is de beste curve een Sigmoid (MMF):

$$EF_{Av} = \frac{(C_a * C_b + C_c * D_{GCD}^{C_d})}{(C_b + D_{GCD}^{C_d})} \quad (\text{kg CO}_2/\text{pkm})$$

Waarin:

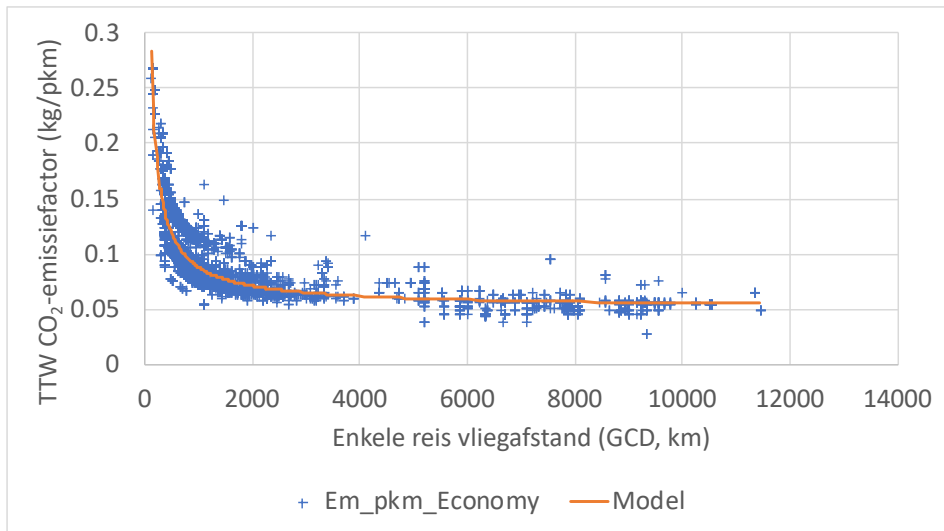
EF_{av} = de gemiddelde CO₂-emissiefactor in kg/pkm

$C_a = 5,6577642$

$C_b = 2,7862227$

$C_c = 0,050489175$

$C_d = 0,87334063$



Figuur 13: Data en model voor de naar aantal zitplaatsen gewogen CO₂-factor per pkm voor Economy Class.

Om de emissies per stoelkilometer te berekenen, moet het resultaat van de formule vermenigvuldigd worden met de bezettingsgraad. Deze is voor de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor Economy Class 87,9%.

Voor de TTW CO₂-emissiefactor per pkm voor Economy Premium Class

En opnieuw beschrijft een Sigmoid (MMF) model de data het best:

$$EF_{Av} = \frac{(C_a * C_b + C_c * D_{GCD}^{C_d})}{(C_b + D_{GCD}^{C_d})} \quad (\text{kg CO}_2/\text{pkm})$$

Waarin:

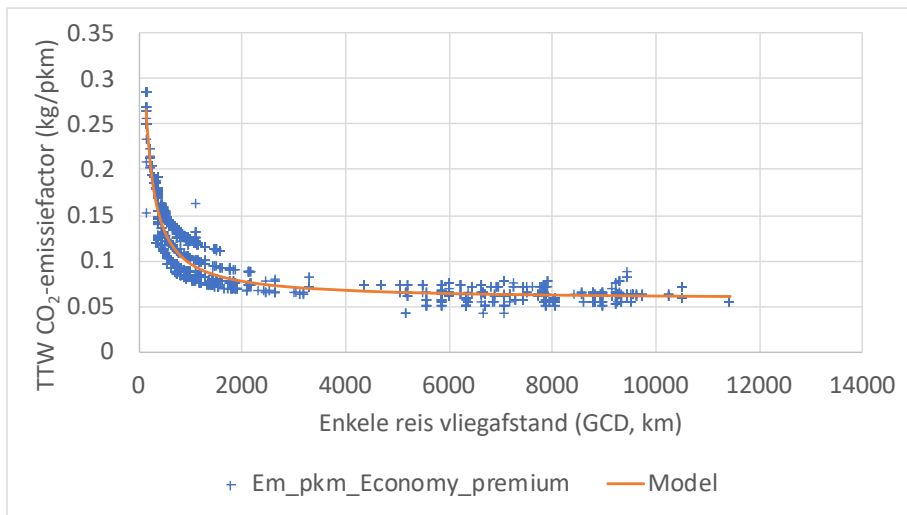
EF_{av} = de gemiddelde CO₂-emissiefactor in kg/pkm

$C_a = 1,0507418$

$C_b = 42,954175$

$C_c = 0,056465055$

$C_d = 1,0017748$



Figuur 14: Data en model voor de naar aantal zitplaatsen gewogen CO₂-factor per pkm voor Economy Premium Class.

Om de emissies per stoelkilometer te berekenen, moet het resultaat van de formule vermenigvuldigd worden met de bezettingsgraad. Deze is voor de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor Economy Premium Class 89,1%.

TTW CO₂-emissiefactor per pkm voor Business Class:

Voor Businessclass vonden we een 5^{de} graads lineaire functie als beste oplossing voor het deel onder de 2610 km GCD afstand:

$$EF_{Bus} = C_a + C_b * D_{GCD} + C_c * D_{GCD}^2 + C_d * D_{GCD}^3 + C_e * D_{GCD}^4 + C_f * D_{GCD}^5$$

EF_{Bus} = de CO₂-emissiefactor in kg/pkm voor Business Class met de volgende coëfficiënten:

$$C_a = 0,38435584$$

$$C_b = -0,000873$$

$$C_c = 1,2428827 * 10^{-6}$$

$$C_d = -8,9388048 * 10^{-10}$$

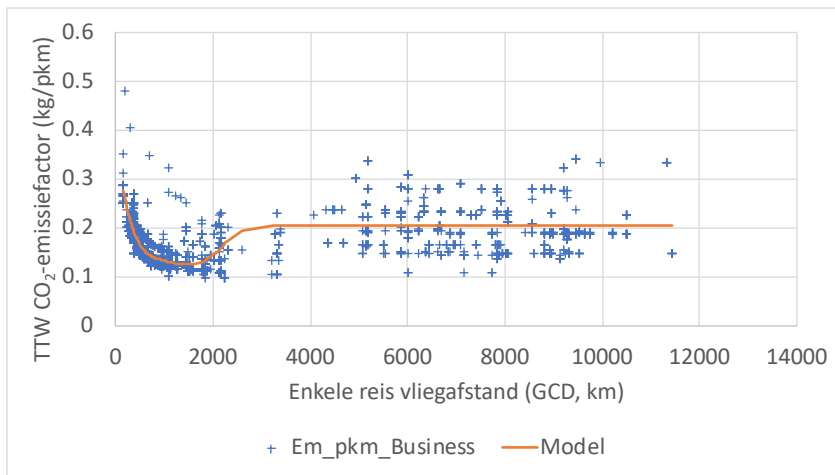
$$C_e = 3,1324031 * 10^{-13}$$

$$C_f = -4,1457908 * 10^{-17}$$

Bij een GCD ≥ 2610 km is de CO₂-emissiefactor een eenvoudige constante:

$$EF_{Bus} = C_g$$

$$C_g = 0,2047 \text{ kg/pkm}$$



Figuur 15: Data en model voor de naar aantal zitplaatsen gewogen CO₂-factor per pkm voor Businessclass.

Om de emissies per stoelkilometer te berekenen, moet het resultaat van de formule vermenigvuldigd worden met de bezettingsgraad. Deze is voor de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor Business Class 86,9%.

TTW CO₂-emissiefactor per pkm voor First Class (in dit geval is een Power gamma curve de beste)

De beste fit voor de naar aantal stoelen gewogen gemiddelde CO₂-emissiefactor per pkm ontstaat met een Sigmoid (Hill3) model. Deze heeft de volgende vorm:

$$EF_{Av} = \frac{C_c * D_{GCD}^{C_d}}{C_c^{C_d} + D_{GCD}^{C_d}} \quad (\text{kg CO}_2/\text{pkm})$$

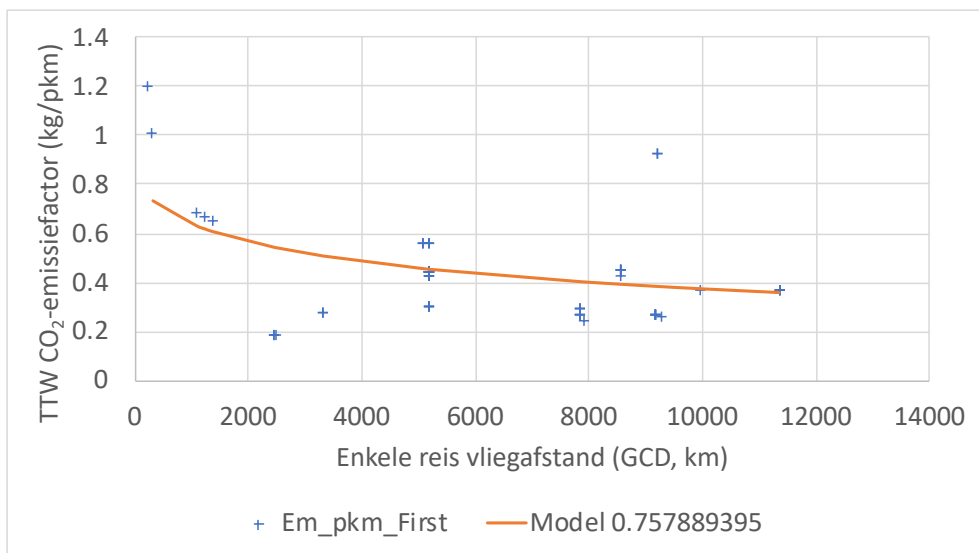
Waarin:

EF_{av} = de gemiddelde CO₂-emissiefactor in kg/pkm

$C_a = 0,87756515$

$C_c = 5786,9619$

$C_d = -0,56527974$



Figuur 16: Data en model voor de naar aantal zitplaatsen gewogen CO₂-factor per pkm voor First class.

Om de emissies per stoelkilometer te berekenen, moet het resultaat van de formule vermenigvuldigd worden met de bezettingsgraad. Deze is voor de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor First Class 79,5%.

5 Aanbevelingen

In dit rapport geven we een update en precisering van de CO₂-emissiefactoren voor luchtvaart. De huidige emissiefactoren werden in 2014 gepubliceerd en waren gebaseerd op drie vliegtuigen van één maatschappij (de KLM). Bovendien was een deel van die gegevens niet openbaar. De nieuwe cijfers zijn op openbare data gebaseerd. Bovendien is uitgegaan van een representatieve steekproef (n=5473) van alle vluchten in 2019 vanaf de vijf Nederlandse luchthavens van nationaal belang. Voor deze steekproef zijn de emissies berekend met het model dat gebruikt wordt om data te genereren voor het Europese Emissions Trading system en dat wordt uitgegeven en onderhouden door Eurocontrol. Bovendien is met behulp van data per luchtvaartmaatschappij van de IATA (de World Air Transport Statistics) de gemiddelde bezettingsgraad per maatschappij bepaald en de mate waarin *belly freight* wordt meegenomen. Ten slotte zijn de emissies toegedeeld naar zitplaatsklasse op basis van de ruimte die een enkele stoel per klasse inneemt. De emissies zijn berekend per stoelkilometer en per passagierskilometer. De emissies per stoelkilometer bieden de meest zuivere uitkomst als het gaat om de eigenschap van het vliegtuig zelf. De emissies per passagierskilometer zijn in hoge mate ook een functie van de bezettingsgraad en derhalve van de manier waarop de luchtvaartmaatschappij opereert en de markt waarin dat gebeurt. Dat varieert nogal per maatschappij. De toedeling naar zitplaatsklassen is een andere essentiële factor, omdat daaruit ten eerste het totaal aantal zitplaatsen volgt. Dit aantal varieert zelfs voor hetzelfde vliegtuigtype zeer sterk tussen luchtvaartmaatschappijen. Daardoor is er niet alleen een groot verschil tussen de vier zitplaatsklassen - dat op kan lopen tot meer dan een factor tien - maar ook tussen de gemiddelden per luchtvaartmaatschappij.

Op grond van de uitkomsten doen we graag de volgende aanbevelingen:

- Het zou goed gebruik zijn om bij elk emissiecijfer per pkm altijd óf de bijbehorende bezettingsgraad te geven óf het getal per skm, omdat met name die laatste een eigenschap van dat vliegtuig is en met de minste onzekerheid omgeven.
- Gebruik waar mogelijk de afstandsfuncties (rekenmodellen) in plaats van de gemiddelden per afstandsklassen. Maar zelfs bij het toepassen van de drie afstandsklassen zal men de *Great Circle Distance* nodig hebben. Deze GCD is eenvoudig te vinden (bijvoorbeeld op de Great Circle Mapper, Swartz, 2020) en dan kan met de functie de gemiddelde emissiefactor exact worden berekend. Bij afstandsklassen ontstaan rond de klassengrenzen afwijkingen van plus en min 25% vanaf dat gemiddelde. In rekentools die specifieke vluchten berekenen zou altijd met de afstandsfuncties gerekend moeten worden, liefst per zitplaatsklasse. Het zou goed gebruik zijn om altijd de TTW CO₂ cijfers te geven naast de opgehoogde cijfers voor CO_{2eq} en WTT. De reden hiervoor is opnieuw dat de CO₂-emissies van de vlucht exact te berekenen zijn, terwijl dat niet geldt voor de factoren gebruikt om CO_{2eq} en WTT-emissies te berekenen.
- Ontraad het gebruik van de constante emissiefactoren (per afstandsklassen en zeker overall).
- Maak waar mogelijk onderscheid naar zitplaatsklasse.
- Update deze cijfers in 2023-2025, waarbij de kanttekening dat voor het bepalen van de CO₂-cijfers over 2020 en 2021 een aparte update wenselijk zou zijn. Die zullen zeker afwijken van die voor 2019 en voor post-Corona jaren vanwege sterk afwijkende bezettingsgraden en een andere verdeling van de vliegtuigtypen.

Literatuur

- Atmosfair. (2016). *atmosfair Flight Emissions Calculator. Documentation of the Method and Data*. Berlin
- CBS. (2020). *Statline*. Retrieved from <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/>
- CO2emissiefactoren.nl. (2018). *Lijst Emissiefactoren Personenvervoer*. Retrieved from https://www.co2emissiefactoren.nl/lijt-emissiefactoren/#brandstoffen_voertuigen
- CO2emissiefactoren.nl. (2021). *Lijst Emissiefactoren Personenvervoer*. Laatste update: 22 februari 2021. Retrieved from https://www.co2emissiefactoren.nl/lijt-emissiefactoren/#brandstoffen_voertuigen
- DEFRA. (2008). *2008 Guidelines to Defra's GHG Conversion Factors: Methodology Paper for Transport Emission Factors*. London
- Eijgelaar, E., Peeters, P. M., Neelis, I., de Bruijn, K., & Dirven, R. (2021). *Travelling large in 2019. The carbon footprint of Dutch holidaymakers in 2019 and the development since 2002* (ISBN: 978-90-825477-6-4). Breda
- Eurocontrol. (2020). *Small emitters tool*. Retrieved from <https://www.eurocontrol.int/tool/small-emitters-tool>
- Even, T. (2003). *Shapes and functions of species-area curves: a review of possible models*. Journal of Biogeography, 30(6), 827-835.
- FlightRadar24. (2021). *About Flightradar24*. Retrieved from <https://www.flightradar24.com/about>
- Głowacki, P., & Kawalec, M. (2015). *Aircraft emissions during various flight phases*. Combustion Engines, 54.
- Groß, S., & Lück, M. (2011). *Flying for a buck or two: Low-cost Carriers in Australia and New Zealand*. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 11(3), 297-319.
- IATA. (2020). *World air transport statistics 2020* (ISBN 978-92-9264-122-1). Montreal-Geneva-London
- ICAO. (2009). *Definition and identification of low-cost carriers* tenth session of the statistics division. Montreal: ICAO.
- ICAO. (2014). *ICAO carbon emissions calculator. Version 7*. Montreal
- ICAO. (2017). *List of Low-Cost-Carriers (LCCs)*. Montreal
- ICAO. (2019). *ICAO aircraft engine emissions databank*. Retrieved from <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank#group-easa-downloads>
- Klein, A., Hilster, D., Scholten, P., Wijngaarden, L. v., Tol, E., & Otten, M. (2021). *STREAM Freight Transport 2020. Emissions of freight transport modes* (21.190235.012). Delft
- Mujica Mota, M., El Makhoulfi, A., Boosten, G., Van Damme, D., & Hunt, E. (2017). *Is your belly empty? The analysis of the transition from full freighters to belly cargo of KLM*. Proc. of ATRS.
- Otten, M. B. J., 't Hoen, M. J. J., & den Boer, L. C. (2014). *STREAM personenvervoer 2014. Studie naar TRansportEmissies van Alle Modaliteiten. Emissiekentallen 2011* (14.4787.20). Delft
- Peeters, P. M. (2018). *Carbon footprint emissie factoren; versie 2017 en trends 2002-2017*. Breda
- Peeters, P. M., & Middel, J. (2007). *Historical and future development of air transport fuel efficiency*. In R. Sausen, A. Blum, D. S. Lee, & C. Brüning (Eds.), *Proceedings of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC)*; Oxford, United Kingdom, 26th to 29th June 2006 (pp. 42-47). Oberpfaffenhoven: DLR Institut für Physik der Atmosphäre.
- SeatGuru. (2021). *Airline Seat Comparison Charts*. Retrieved from <https://www.seatguru.com/charts/generalcharts.php>
- SeatMaestro. (2021). *About us*. Retrieved from <https://www.seatmaestro.com/about-us/>
- Swartz, K. L. (2020). *Great Circle Mapper*. Retrieved from <http://www.gcmap.com/>
- Vasilyev, S. (2013). *FindGraph* (Version 2.481). Vancouver: Uniphiz Lab.

- Wehner, C., López-Bonilla, J. M., López-Bonilla, L. M., & Santos, J. A. C. (2018). *State of the art of pricing policy in air transportation: network carriers vs. low-cost airlines*. *Tourism and Management Studies*, 14(3), 32-40.
- Wikipedia. (2021a). *Fare basis code*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Fare_basis_code
- Wikipedia. (2021b). *List of airline codes*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_airline_codes
- www.avcodes.co.uk. (2021). *Airline Designator / Code Database Search*. Retrieved from www.avcodes.co.uk



Games



Media



Hotel



Facility



Built Environment



Logistics



Tourism



Leisure & Events



Breda
University
OF APPLIED SCIENCES

Mgr. Hopmansstraat 2
4817 JS Breda

P.O. Box 3917
4800 DX Breda
The Netherlands

PHONE

+31 76 533 22 03

WEBSITE

www.buas.nl

DISCOVER YOUR WORLD